

MANUAL DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS

POR:

ING. CESAR ANTONIO GERONIMO MAYOR

TEMARIO

CAPITULO I: CARACTERISTICAS, VENTAJAS, DESVENTAJAS Y APLICACIONES

Introducción
Ventajas y desventajas de las fibras ópticas
Aplicaciones de las fibras ópticas
Espectro electromagnético
Ley de Snell
Reflexión y refracción de la luz
Índice de refracción
Angulo critico
Reflexión total
Angulo de aceptancía
Apertura numérica
Reflexión de Fresnel
Frecuencia normalizada V
Función del Perfil de índice de refracción
Campo modal

CAPITULO II: CLASIFICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS

Fibra óptica Monomodo
Fibra óptica Multimodo
Dispersión de una fibra óptica
Velocidad de grupo y de fase en un medio disperso
Retardo de grupo
Parámetros de transmisión de la fibra óptica
Atenuación
Absorción
Dispersión energética lineal
Dispersión de Rayleigh
Atenuación por irregularidades periódicas
Atenuación producida por micro curvaturas y micro fisuras
Atenuación por curvado
Dispersión energética lineal
Atenuación por empalme
Pérdidas por conector
Ancho de banda
Dispersion modal
Dispersion cromatica
Dispersion material
Dispersion por guia de onda
Dispersion de modo de polarizacion

CAPITULO III: FABRICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS

Materiales para la fabricación
Procesos de fabricación: MCVD, VAD, OVD, PCVD
Proceso de estirado

CAPITULO IV: CABLES DE FIBRA OPTICA

Revestimiento de los conductores
Tipos de cables de fibra óptica
Cables de fibra óptica de tipo ajustado
Cables de fibra óptica tipo PAL
Cables de fibra óptica tipo CINTA
Cables de fibra óptica tipo PAL CORRUGADO

CAPITULO V: EMPALMES (SPLICE)

Empalme de fibra óptica
Métodos de empalme: de fusión, mecánico y unión adhesiva.

CAPITULO VI: DISPOSITIVOS OPTICOS

Fuentes o emisores ópticos
Diodo LED
LED de emisión superficial
LED de borde
Valores caracterices de los LED
Diodo LASER, características
Valores caracterices de los LASER
Parámetros de LED y LD
Potencia óptica de emisión
Detectores o receptores ópticos
Fotodiodo PIN
Fotodiodo APD
Parámetros característicos de los fotodetectores
Características comparativas entre PIN y APD

CAPITULO VII: SISTEMA DE TRANSMISION OPTICO

Parámetros funcionales del sistema
Tabla de los parámetros típicos de los sistemas de fibra óptica
Estrategias para el diseño de sistemas de fibra óptica
Procedimiento para el diseño de un enlace de fibra óptica

PROBLEMAS Y EJERCICIOS

BIBLIOGRAFIA

Presentación

El autor cuenta con una basta experiencia en la docencia universitaria y en la práctica profesional, pues viene ejerciendo la profesión de ingeniero electrónico desde 1994 y docente universitario desde 1998.

La presente obra, constituye una recopilación de material empleado para la cátedra del curso de ***Comunicaciones Ópticas***, hecha por el autor, en los diez años de experiencia que tiene como catedrático en este tema.

Se ha tratado de ilustrar el desarrollo del tema tomando información de diversas fuentes, así como ejercicios y problemas prácticos fruto de la propia experiencia del autor.

Esta es una primera edición de esta obra, para lo cual se agradecerá cualquier crítica contractiva de la misma que ayude a mejorar y ampliar su contenido en próxima versiones.

CAPITULO

1

CARACTERISTICAS, VENTAJAS, DESVENTAJAS Y APLICACIONES

Introducción
Ventajas y desventajas de las fibras ópticas
Aplicaciones de las fibras ópticas
Espectro electromagnético
Ley de Snell
Reflexión y refracción de la luz
Índice de refracción
Angulo critico
Reflexión total
Angulo de aceptancía
Apertura numérica
Reflexión de Fresnel
Frecuencia normalizada V
Función del Perfil de índice de refracción
Campo modal

CAPITULO I

CARACTERISTICAS, VENTAJAS Y APLICACIONES DE LA FIBRA OPTICA

INTRODUCCIÓN:

La necesidad de incrementar el rendimiento de un sistema de telecomunicaciones constituye la motivación que induce al empleo de medios de cada vez mayor capacidad. Así es como surgieron los sistemas de multiplexación de la información, con el fin de ampliar el ancho de banda de transmisión conforme crece el numero de canales a transmitir, es decir se tenia una marcada tendencia hacia la utilización de frecuencias cada vez mas altas hasta el punto de llegar a frecuencias de transmisión cercanas a la luz.

Las investigaciones se han orientado principalmente a examinar los tres componentes básicos de un sistema de transmisión por fibras ópticas: el medio de transmisión las fuentes ópticas moduladas por la señal que lleva la información y el detector óptico, que extrae de la portadora óptica modulada una señal prácticamente igual a la señal presente a la entrada.

En lo relativo al medio de transmisión se analizaron tres posibilidades:

- Visibilidad directa a través del aire (propagación en el espacio libre).
- Haz de luz guiado por medio de espejos y/o lentes (guías de tubo metálico)
- Fibras de vidrio.

El primero, es decir la transmisión a través de la atmósfera, se vio limitado debido a que las pérdidas de propagación se incrementan mucho debido a las lluvias y la niebla. Además la transmisión de la visibilidad directa, es decir se requiere de una exacta precisión.

El segundo, el haz guiado implica muchas dificultades en su instalación.

En cuanto a la fibra de vidrio, podemos señalar que la primera fibra óptica presentaba atenuaciones por encima de 500 dB/km., lo cual hizo imposible su utilización como medio de transmisión.

En la actualidad, existe la fibra óptica (que es una hebra de vidrio de alta pureza y de el grosor de un cabello) de guía de ondas (monomodo) de dispersión desviada, con lo cual se envía una señal de 565 Mbps. (7 ,680 canales telefónicos) a una distancia de 80 Km. Sin regeneración alguna y con una atenuación media de 0.22 dB/Km.

Con la investigación de nuevos materiales se permitirá aumentar notablemente el rendimiento de los sistemas. Así tenemos ahora en investigación fibras de silicio a base de cristales halógenos que podrían reducir teóricamente la atenuación hasta el punto que un solo cable pudiera atravesar un océano sin repetidores.

VENTAJAS DE LA FIBRA OPTICA:

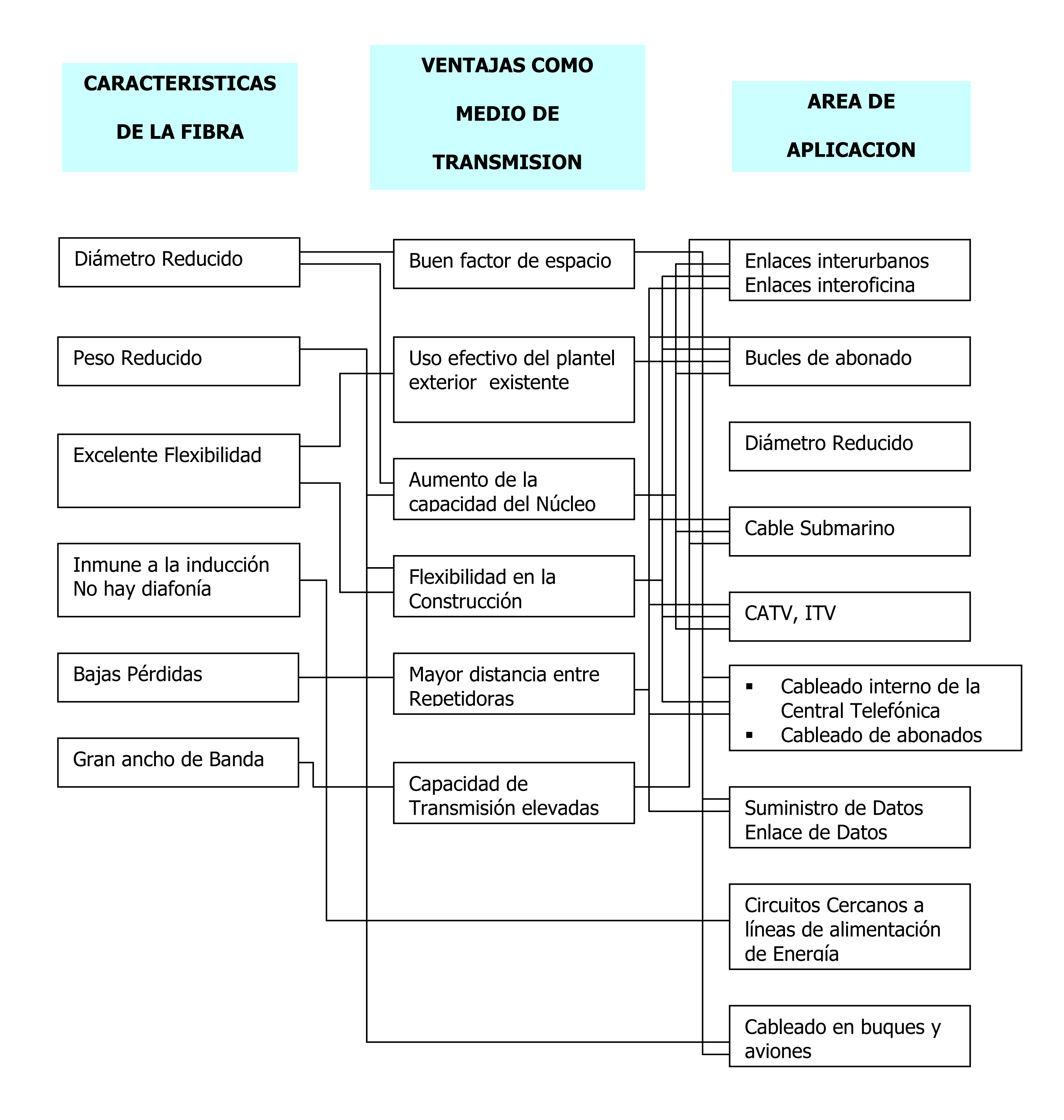
- Elevado ancho de banda, lo cual permite una gran capacidad de transmisión de información, que se traduce en un mayor rendimiento de los sistemas.
- Reducido el valor de atenuación sobre las señales que se propagan a través del portador. En consecuencia la separación entre repetidoras en una línea de transmisión óptica puede ser varias mayor (10 veces) a la necesaria que en el caso de cables convencionales o bien pueden prescindirse de ellos.
- Las características de transmisión son muy poco alteradas por cambios en la temperatura , siendo innecesario y/o simplificada la ecualización y compensación de las variaciones en tales propiedades (estable de -40° a 80°c)
- Las señales se pueden transmitir a través de zonas eléctricamente ruidosas con muy bajo índice de error y sin susceptibilidad alguna a la interferencia eléctrica.
- La diafonía no es problema debido a la no inducción de campos eléctricos y magnéticos.
- Puesto que las fibras no radian energía electromagnética, la señal por ellas trasmitidas no puede ser captada desde el exterior, además es técnicamente imposible extraer subrepticiamente información de una fibra sin alterar notoriamente los parámetros de transmisión.
- No plantea peligros de descarga eléctricas ni de incendios.
- Su reducido tamaño y peso, y relativamente alta resistencia mecánica, los problemas de almacenamiento, transporte, y sobre todo instalación se ven disminuidos. Para hacer una idea comparativa en este sentido debemos señalar que mientras no es conveniente tener tramas de cables con ocho ó diez tubos coaxiales de más de 200 ó 300 metros de longitud, con fibra óptica y capacidad equivalente puede superarse sin dificultad la distancia de uno ó dos Kilómetros.
- Puede fabricarse cables muy livianos ya que el peso específico del vidrio es la cuarta parte la del cobre.
- La materia prima utilizada en la fabricación de fibra óptica, el dióxido de silicio (Sio2), es uno de los recursos que más abundan en la superficie terrestre.

DESVENTAJAS DE LA FIBRA OPTICA:

Es necesario indicar algunos inconvenientes que aún se presentan en los sistemas de transmisión por fibras ópticas:

- Si bien para la fabricación de fibras ópticas existe la materia prima arena de cuarzo como material de perdida, se requiere en comparación a la purificación metálica, mucho más energía para obtener un vidrio de la pureza química necesaria.
- Dado que la fibra óptica es un producto muy delicado necesita durante el cableado un tratamiento particularmente cuidadoso y, en parte, una dotación de máquinas especiales.
- Es necesario desarrollar nuevos elementos con máxima precisión.
- Lo mismo rige para la técnica de medición que debió ser complementada parcialmente con nuevos procesos.
- A pesar de estos inconvenientes, las comunicaciones por fibras ópticas, tienen una gran variedad de aplicaciones los cuales los cuales podemos resumir brevemente.
- Aplicaciones dentro del local, cuando la longitud del cable es de <= 1Km, con transmisión entre terminales localizados enteramente en edificios, aeroplanos, barcos, etc.
- Comunicaciones en compañías eléctricas, los sistemas de transmisión por fibras ópticas son atractivas para las compañías de potencia. Los servicios podrán incluir voz, servicio de datos en la banda vocal, sistema de control y supervisión privada para generación y distribución de potencia.
- Enlace entre centrales, para ésta aplicación los sistemas de fibra óptica pueden usarse para conectar oficinas centrales dentro de ciudades en distancias de 5 y 10 Km. sin repetidores.
- Enlaces submarinos, los sistemas de fibra óptica son muy convenientes para estos enlaces, utilizando fibras monomodo de pérdidas bajas y gran ancho de banda. Obviamente las repetidoras deben tener tiempo de vidas grandes y con valores de 1 millón de horas para la vida del láser.

APLICACIONES DE LA FIBRA OPTICA



ESPECTRO ELECTROMAGNETICO:

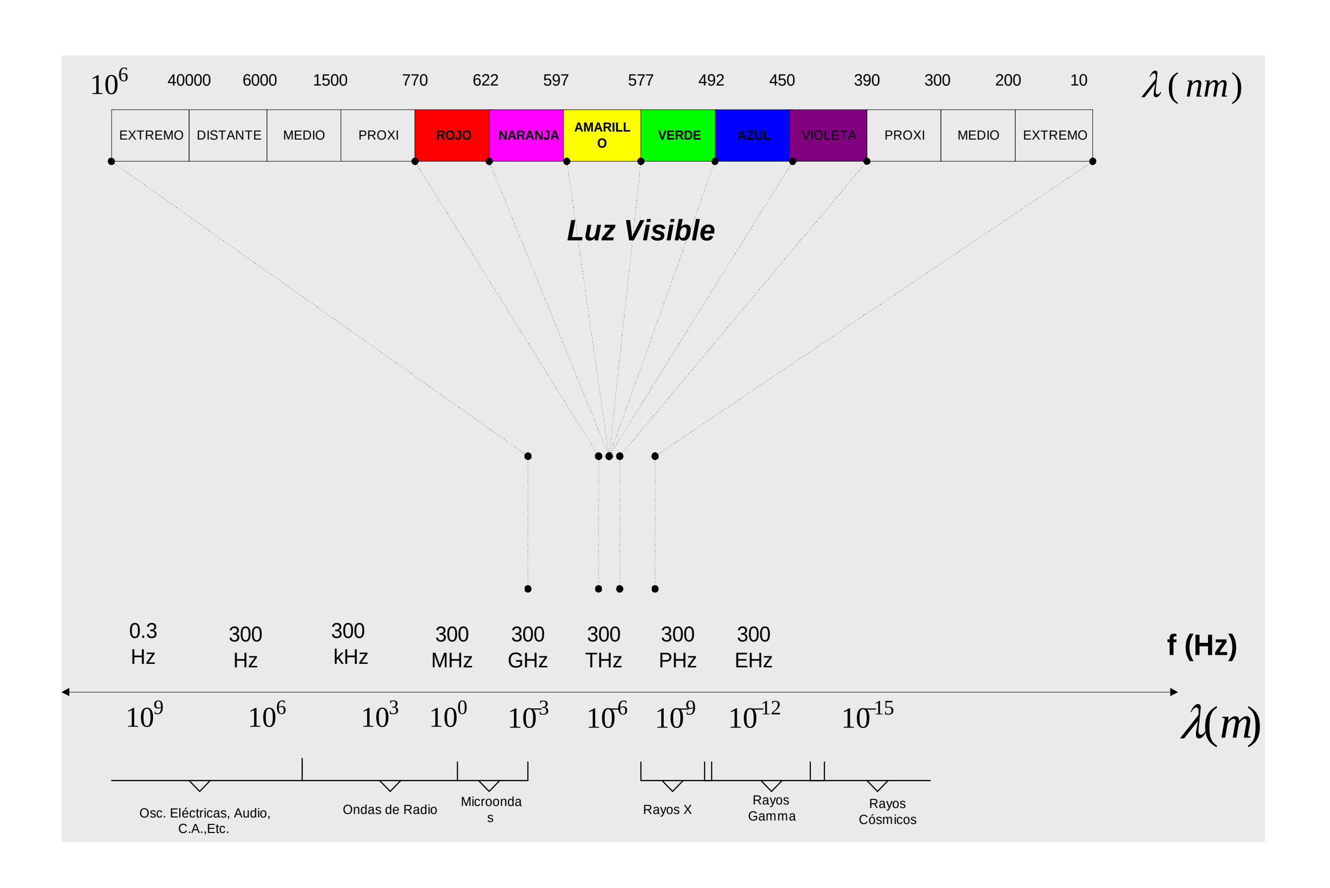
Una carga eléctrica en movimiento produce ondas electromagnéticas. Estas ondas se desplazan en el vacío a una velocidad (c), denominada velocidad de la luz, de 300000 Km. / seg. Dependiendo de la frecuencia (f) a la que se emitan las ondas, éstas tendrán una longitud de onda (λ) determinada.

En otras palabras, la frecuencia eléctrica está definida como la cantidad de veces que se repite el ciclo de una señal eléctrica en un segundo. De aquí podemos decir que un ciclo de una señal eléctrica toma cierto tiempo desde que se inicia hasta que termina.

La longitud de onda es entonces la distancia que recorre un ciclo de señal eléctrica de una frecuencia determinada, durante el tiempo que se toma desde que inicia hasta que termina, a una velocidad de 300000 Km/s, que es la velocidad de la luz.

Si colocamos en una gráfica todas las longitudes de ondas (λ), tendremos lo que se denomina el espectro de radiaciones electromagnéticas:

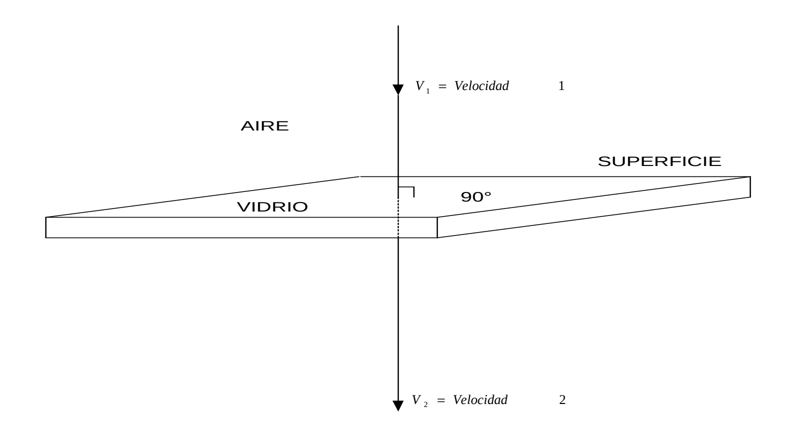
ESPECTRO DE TRABAJO DE LOS SISTEMAS OPTICOS



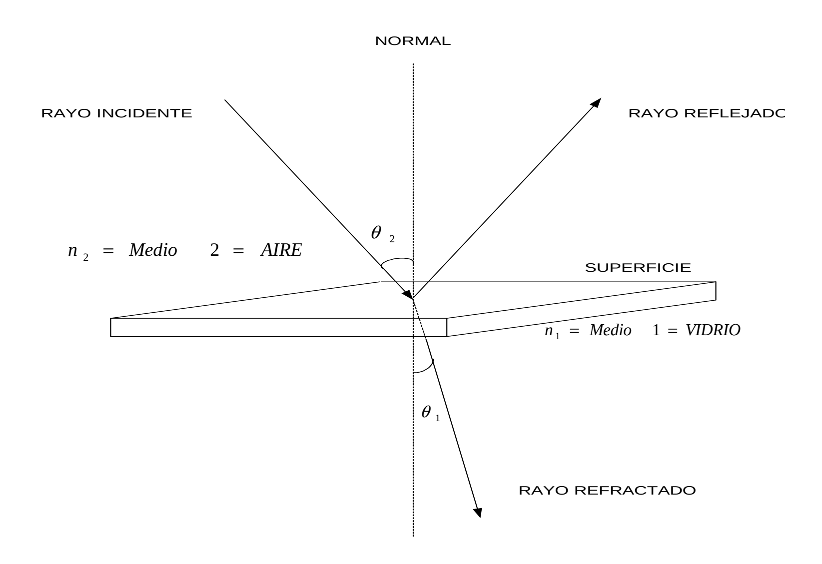
LEY DE SNELL

REFLEXION Y REFRACCION DE LA LUZ:

Cuando un rayo de luz incidente cae perpendicularmente en una superficie que separa 2 medios (aire y vidrio), sólo hay un cambio en la velocidad de propagación, manteniéndose la dirección y el sentido:



Cuando el rayo de luz incidente cae con alguna inclinación formando un ángulo diferente de 90 grados, con relación a la superficie, se presenta un cambio en su velocidad y en su dirección, en este caso se dice que hubo una refracción o una reflexión del rayo (haz):



Parte del rayo se refracta y parte del rayo se refleja, dependiendo de la inclinación del rayo incidente, y de la naturaleza de los medios en que éste se propaga (n).

La relación entre los dos ángulos (θ1 incidente y θ_2 refractado) es dada por la “Ley de Snell o Ley de Refracción”:

$$n_1 \ Sen \ \theta_1 = n_2 \ Sen \ \theta_2$$

Siendo n el “índice de refracción de cada medio”.

El índice de refracción (n), es el que define el comportamiento de la propagación de la luz y su paso de un medio a otro.

Un rayo luminoso que incide desde un medio (n_2), en otro medio (n_1), tal que $n_1 > n_2$, tiende a refractarse en el medio (n_1).

Si por el contrario, el rayo incide en un medio (n_2), desde otro medio (n_1), tal que $n_1 > n_2$, tiende a reflejarse en el mismo medio (n_1).

Los siguientes son valores típicos de los índices de refracción de algunos materiales:

MATERIAL	INDICE DE REFRACCION
Vacío	1.0
Aire	1.00003
Hielo	1.309
Vidrio Común	1.520
Diamante	2.417
Cuarzo fundido	1.460
Alcohol etílico	1.361
Alcohol metílico	1.329
Agua	1.333
Glicerina	1.473

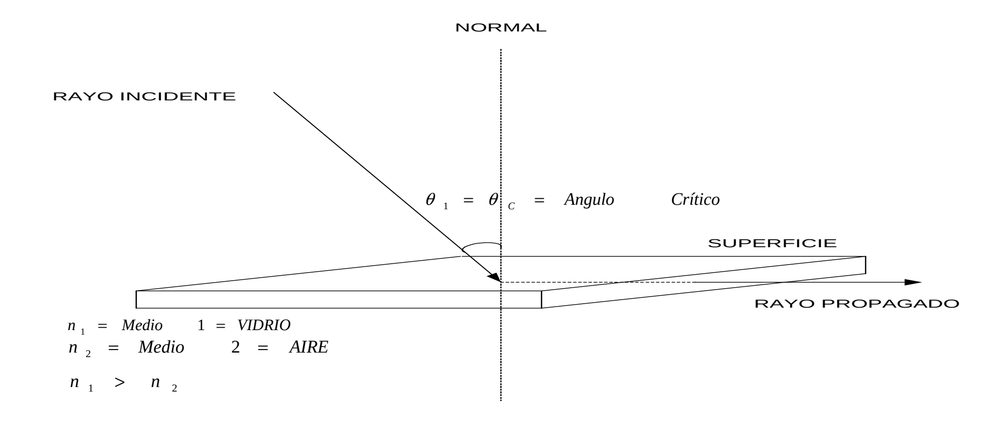
INDICE DE REFRACCION:

El índice de refracción de un material puede definirse en términos de la relación entre la velocidad de propagación de la luz a través de éste y la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

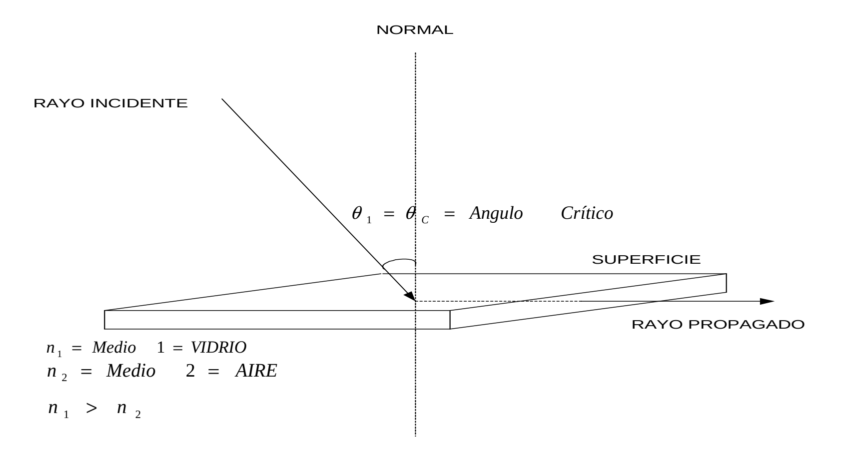
$$n = \frac{C_O}{C_1}$$

C_O = Velocidad de propagación de luz en el vacío (3×10^8 m/s).
C_1 = Velocidad de propagación de la luz en el material.

ANGULO CRÍTICO (θ_C):
Representa El máximo valor angular de un rayo incidente que produce una señal reflejada en el limite núcleo – revestimiento.



Cuando el ángulo incidente θ_1 aumenta de tal manera que el ángulo del rayo refractado θ_2 sea igual a 90 grados con relación a la normal, el ángulo incidente recibe el nombre de “Angulo Crítico”.



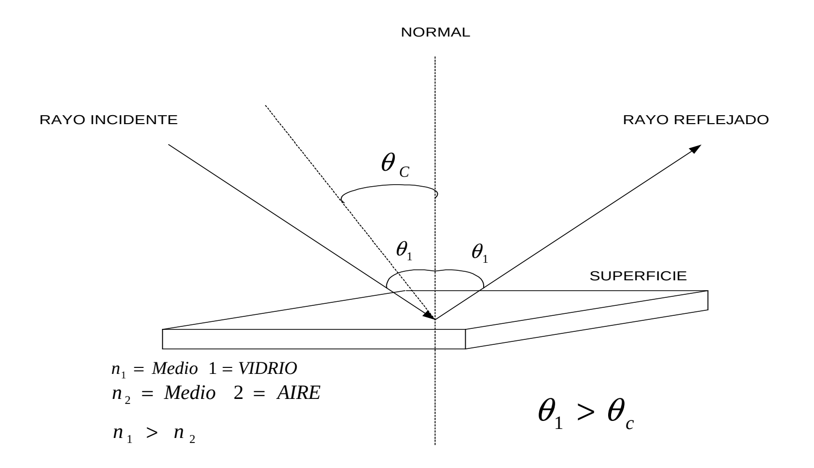
Si aplicamos la Ley de Snell a esta situación, queda:

$$n_1 \ Sen \ \theta_1 = n_2 \ Sen \ \theta_2$$
$$n_1 \ Sen \ \theta_1 = n \ Sen \ (90^o)$$
$$n_1 \ Sen \ \theta_1 = n_2 \ (1)$$
$$\Rightarrow \quad Sen \ \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

En esta situación, θ_1 es el ángulo crítico, y depende solamente de los índices de refracción de los materiales en los cuales se propague la señal.

REFLEXION TOTAL:

Si el ángulo del rayo incidente θ_1 sigue creciendo y se hace mayor que el ángulo crítico θ_C, el rayo luminoso pasará a ser totalmente reflejado, o sea, regresará al medio de incidencia. Este efecto se denomina "Reflexión Total":

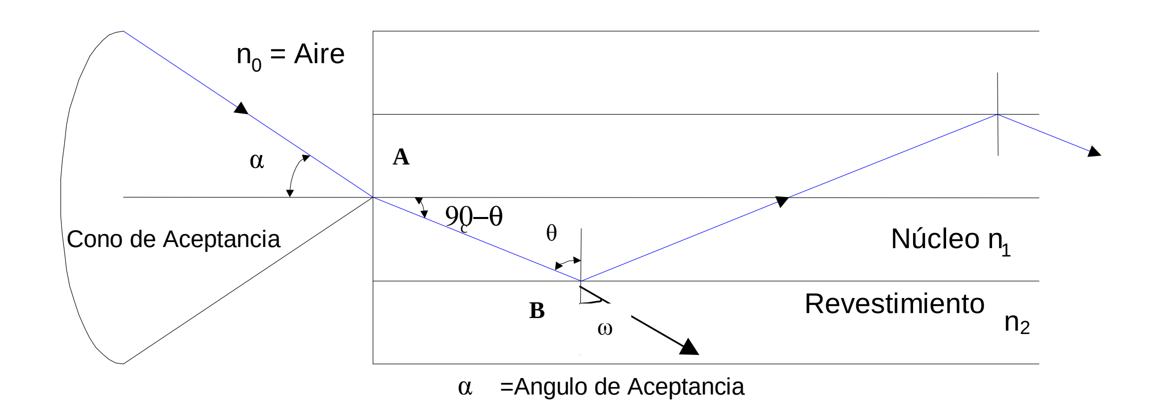


Si se construye una estructura de dos (2) medios cristalinos, siendo el medio interno el de mayor índice de refracción, se puede tener un rayo luminoso que se propague a lo largo del medio interno, siempre y cuando el ángulo de incidencia del rayo sea mayor que el ángulo crítico.

En la fibra óptica se utiliza el efecto de "Reflexión Total", para conducir un rayo luminoso por un conductor que en su centro tiene un núcleo formado por vidrio con un índice de refracción n_1, envuelto en un revestimiento formado por un vidrio con un índice de refracción n_2, siendo:

$$n_1 > n_2$$

Problema: Hallar el ángulo de incidencia α máximo admisible del rayo sobre la cara transversal de la fibra que tiene como valor de índice de refracción n_0 que corresponde al aire.



En A:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } (90-\theta)} = \frac{n1}{no} \qquad \text{Si } no = n_{AIRE} = 1$$

Por tanto: sen α = n1 cos θ .... (1)

Por identidades trigonométricas:

$$Sen^2\theta + Cos^2\theta = 1 \quad \rightarrow \quad Cos\theta = \sqrt{1 - Sen^2\theta}$$

En (1):

$$Sen\,\alpha = n_1\sqrt{1 - Sen^2\theta} \ldots\ldots(2)$$

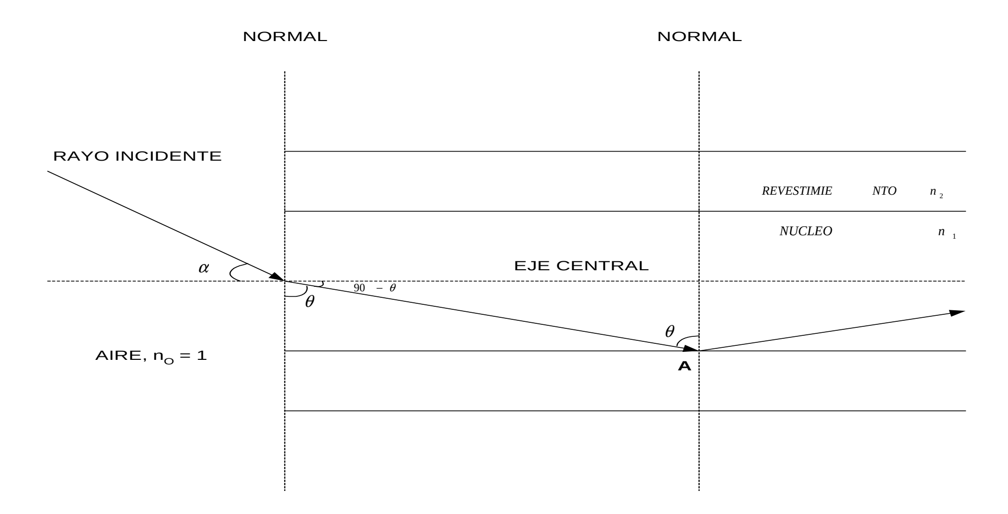
$$\frac{Sen\,\theta_R}{Sen\,\omega} = \frac{n_2}{n_1} \quad \rightarrow \quad S\eta i\,\omega = 90^O \quad \rightarrow \quad Sen90^O = 1$$

$$Sen\,\theta_C = \frac{n_2}{n_1} \ldots\ldots(3)$$

- Al máximo ángulo (α) se le denomina ángulo de aceptancía de la fibra óptica.
- El ángulo de aceptación representa la mitad del ángulo del cono de aceptación.
- La fibra óptica sólo conducirá los rayos que estén dentro del cono de aceptación.

ANGULO DE ACEPTANCIA:

En el punto A de la figura siguiente, el ángulo (θ), puede decirse que es el ángulo crítico; todos los rayos que incidan con un ángulo mayor a (θ), con relación a la normal (N), serán conducidos por el núcleo de la fibra óptica:



En la figura anterior, para acoplar al núcleo de la fibra óptica un rayo luminoso incidente desde el exterior (con n_O = 1), el ángulo (α) formado entre el rayo incidente y el eje de la fibra se rige por la ley de Snell, de la siguiente forma:

$$n_1 Sen\ \theta_1 = n_2 Sen\ \theta_2$$

Reemplazando:

$$n_O Sen\ \alpha = n_1 Sen\ (90 - \theta)$$

Como $n_O = 1$ (aire), tenemos:

$$Sen\ \alpha = n_1 Sen\ (90 - \theta)$$

En la figura sabemos por geometría que:

$$Sen\ (90 - \theta) = Cos\ \theta, \quad \rightarrow \quad Sen\ \alpha = n_1 Cos\ \theta \ \ldots \ldots (1)$$

De acuerdo a las identidades trigonometriítas sabemos que:

$$Sen^2\theta + Cos^2\theta = 1 \quad \rightarrow \quad Cos\ \theta = 1 - Sen^2\theta \quad \rightarrow \quad Cos\ \theta = \sqrt{1 - Sen^2\theta} \ldots\ldots\ldots (2)$$

De (2) en (1) tenemos:

$$sen\ \alpha = n_1 \sqrt{1 - sen^2\theta} \ldots\ldots\ldots .(3)$$

En el punto A de la figura, cuando el ángulo del rayo refractado es igual a 90º con relación a la normal (N), el ángulo del rayo incidente se denomina crítico y se cumple que:

$$Sen\ \theta = \frac{n_2}{n_1} \ldots \ldots \ldots (4)$$

Reemplazando (4) en (3), queda:

$$Sen\ \alpha = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

Aplicando el mínimo común denominador en el radical, queda:

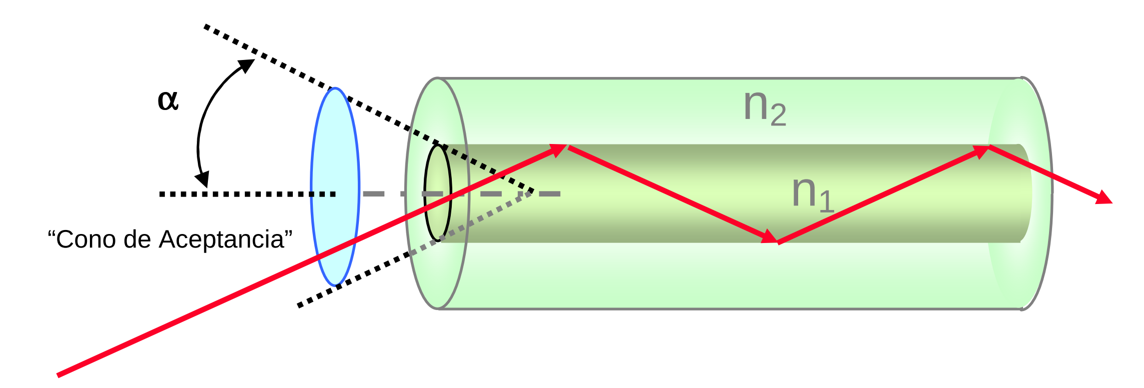
$$Sen\ \alpha = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha = Sen^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

Al máximo ángulo (α), se le denomina **ángulo de aceptancia** de la fibra óptica y es función solamente de los índices de refracción del núcleo (n1), y del revestimiento (n2).

El ángulo de aceptancia representa la mitad del ángulo del cono de aceptancia.

La fibra óptica sólo conducirá los rayos que se encuentren dentro del cono de aceptación.



APERTURA NUMERICA:

Al seno del ángulo de aceptación (α) se le denomina APERTURA NUMERICA (AN), y está dada por la expresión:

$$AN = Sen\ \alpha$$

donde:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Puede decirse, que la apertura numérica es equivalente al porcentaje de potencia de luz, que desde la fuente, entra a la fibra óptica. Valores típicos de AN son 0.14 a 0.20, lo que equivale a decir que sólo del 14% al 20% de la luz emitida por la fuente (LED – LASER), son aceptados por la fibra.

REFLEXION DE FRESNEL:

Parte de la potencia óptica incidente se ve reflejada en la frontera de dos medios con distinto índice de refracción.

$$Cos\ \theta_R = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = Sen\ (90 - \theta_R)$$

$$Sen\ (90 - \theta_R) = \sqrt{\frac{(n_1 - n_2).2\,n_1}{n_1^2}} = \sqrt{\frac{(n_1 - n_2).2}{n_1}}$$

$$Sen\ (90 - \theta_R) = \sqrt{2\Delta}\,, \quad donde \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

En A:

$$\frac{Sen\ \alpha}{Sen\ (90 - \theta_R)} = \frac{n_1}{n_O} \rightarrow Sen\ \alpha = n_1\sqrt{2\Delta} = AN$$

Los rayos menores al ángulo crítico se reflejan totalmente.

Problema:

Se tiene una fibra óptica con un núcleo de vidrio que posee un índice de refracción de 1.52 y un revestimiento de cuarzo fundido con un índice de refracción de 1.46. Se necesita determinar:

a) Angulo Crítico.
b) Angulo de Aceptancia.
c) Apertura Numérica de dicha fibra.

Solución:

a) $$Sen\ \theta_C = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.46}{1.52} \rightarrow \theta_C = Sen^{-1}(0.96) = 73.7^O$$

b) $$\alpha_{MAX} = Sen\,\alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{0.17} \rightarrow \alpha = Sen^{-1}(0.422) = 24.5$$

c) $$AN = Sen\ \alpha = Sen\ 24.5 = 0.422$$

Este valor indica que el 42% de la luz emitida por la fuente es aceptada por la fibra óptica.
Interpretación:

$$\alpha_i = 0 \quad \alpha_i = 15^o$$

$$\frac{Sen\ \vartheta_t}{Sen\ \theta_R} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow Sen\,\theta_t = \frac{1}{1.5}\left(Sen\ 0^O\right) \rightarrow \theta_t = 0^O$$

$$Sen\,\theta_t = 0.6 Sen\left(15^O\right) = 0.17 \rightarrow \theta_t = 9.9^O$$

FRECUENCIA NORMALIZADA (V):

Es un parámetro que describe la estructura del modo.

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda_O}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

r : Radio del núcleo de la fibra.
λ_O : Longitud de onda de luz.
n1 y n2: Índices de refracción del núcleo y revestimiento

El parámetro V es importante porque relaciona el máximo ángulo de aceptancía de la fibra, el número de modos electromagnéticos en la fibra y la cantidad de dispersión introducida por las diferentes trayectorias entre los modos.

Para un valor de V < 2.405, solamente se propagarán el modo TE_{11}.

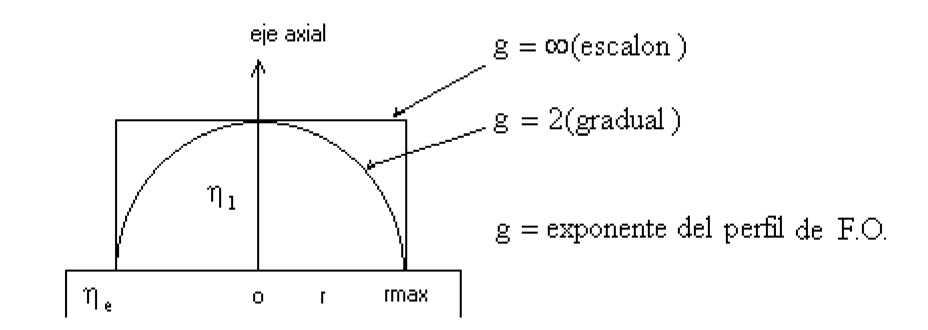
Fibra índice escalón : $M_{IE} = \frac{V^2}{2}$

Fibra índice gradual : $M_G = \frac{V^2}{4}$

Para grandes valores de V, los modos que son cercanos al punto de corte:

$$\frac{P_{ENVOLTURA}}{P_{TOTAL}} = \frac{4}{3N^{1/2}}$$ donde M: Número total de modos

FUNCION DE PERFIL DE INDICE DE REFRACCION



$$\eta^2_{(r)} = \eta_1^2[1 - 2\Delta(r/r_{max})^g]$$

$r > r_{max}$

$\eta(r_{max}) = \eta_2$

$\eta_{(r)} \Rightarrow$ Índice de refracción del núcleo a una distancia (r)

$\eta_{1(r=0)} \Rightarrow$ Índice de refracción del núcleo en el eje axial

$\eta_2 \Rightarrow$ Índice de refracción del manto

$\Delta \Rightarrow$ Diferencia relativa de índices

Para calcular el perfil del índice de refracción se calcula de la siguiente forma:

$$n_1\left[1 - 2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^g\right]^{1/2} \qquad r < a$$

$$n1[1 - 2\Delta]^{1/2} \approx n_1(1 - \Delta) = n_2 \qquad r > a$$

A medida que se reduce el diámetro del núcleo de la fibra óptica, la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento es menor ($n_1 \approx n_2$), se acentúa más el único modo de propagación de la luz.

Problema:

1.- Se tiene una $F.O_{MM}$ 50/125μm de perfil de índice gradual cuya función es:

$$\eta_{(r)} = \sqrt{2{,}25 - 0{,}000032r^2}$$

Calcular:
Δ = Diferencia relativa de índices de refracción.
η_1 = Índice de refracción del núcleo.
η_2 = Índice de refracción del manto
AN= Apertura numérica.

$$\eta_2 = \sqrt{2{,}25 - 0{,}000032(25)^2} = 1{,}4933$$

$$\Delta = \frac{(1{,}5)^2 - (1{,}4933)^2}{2(1{,}5)^2} = 0{,}44\%$$

Sen θ_A =AN= $\eta_1\sqrt{2\Delta} = 1{,}5\sqrt{2(0{,}0044)}$

AN=0,141

2.- Hallar el índice de refracción del núcleo cuando r =10μm de una $F.O_{MM}$ 50/125μm , sabiendo que el índice máximo del núcleo es 1,5 y la diferencia relativa de índices es 1%. Calcular:

a) Escalón $\eta_1 = 1,5$ (η_1 y η_2 son ctes.)
b) Gradual $\eta_{(r=10)} = 1,2198$

$$\eta^2_{(r=10)} = 1,5(1-2(0,01)\left(\frac{10}{25}\right)^2) = 1,2198$$

3.- Supóngase que con el fin de minimizar el efecto de dispersión modal se desea diseñar una $F.O_{MM}$ del tipo de índice gradual y que soporte hasta 2000 modos, dicha fibra se alimenta con un láser de cd de 780nm de longitud de onda . Si el Angulo de aceptancia de la fibra óptica es de 13,5 y el índice de refracción máximo del núcleo es igual a 1,48. Calcular:

a) AN=Sen θ_A =0,2334
b) V=89,443
c) a=47,573μm
d) $\Delta = 1,24\%$
e) $\eta_{(r)} = \sqrt{2,1904 - 0,000096r^2}$

$$N = \frac{V^2}{2}\left(\frac{g}{g+2}\right) = \frac{V^2}{2}\left(\frac{2}{4}\right) \qquad V = 2\sqrt{N} = 89,443$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} AN$$ a=47,573μm

$$Sen\theta_A = \eta_1\sqrt{2\Delta} \qquad \Delta = \frac{Sen^2\theta_A}{2\eta_1^{\,2}} = 1,24\%$$

$$\eta_{(r)} = \sqrt{\eta_1^{\,2} - 2\eta_1^{\,2}\Delta(r/r\,max)^g} \qquad \eta_{(r)} = \sqrt{(1,48)^2 - 21,48)^2(0,0124)(2r/(47,573)^2)}$$

$$\eta_{(r)} = \sqrt{2,1904 - 2.4x10^{-5}r^2}$$

4.- Se tiene un conductor de fibra óptica con perfil gradual cuyo diámetro del núcleo es de 50 µm, su apertura numérica es de 0.2, y su longitud de onda (λ), es de 1µm. ¿Cuántos modos de propagación de luz serán conducidos por el núcleo de esta fibra?

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda_O}.AN = \frac{2(3.14)(25\ \mu m)}{1\mu m}(0.2) \Rightarrow V = 31.4$$

Para una F.O. índice gradual:

$$M_G = \frac{V^2}{4} = \frac{(31.4)^2}{4} = 246.5$$

Están viajando 247 modos de propagación de luz diferentes.

5.-

a) Determinar el parámetro V, a $\lambda = 0.85\ \mu m$, para una fibra índice escalón con un diámetro de núcleo de 50 μm, $n_1 = 1.47$, $n_2 = 1.45$.

b) ¿Cuántos modos de propagación existen en esta fibra a 0.82 μm?

c) ¿a 1.3 μm?

d) ¿Qué porcentaje de la potencia óptica fluirá en la envoltura para cada operación de longitud de onda?

Solución:

a)

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda_O} AN = \frac{2\pi(35)}{0.85}(0.2417) = 44.6$$

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{(44.6)^2}{2} = 994.25$$

b)

$$V = \frac{2\pi(25)}{0.82} 0.241 = 46.3$$

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{(46.3)^2}{2} = 1071.84$$

c)

$$V = \frac{2\pi(25)}{1.3\mu m} 0.241 = 29.2$$

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{(29.2)^2}{2} = 426.45$$

d) Para grandes valores de V, puede ser estimado a 0.85 μm:

$$\frac{P_{ENVOLTURA}}{P_{TOTAL}} \quad \frac{4}{3(31.53)} = 4.24\ \%$$

$$a\ 1.3\ \mu m : \frac{P_{ENVOLTURA}}{P_{TOTAL}} = 6.45\ \%$$

$$a\ 0.82\ \mu m : \frac{P_{ENVOLTURA}}{P_{TOTAL}} = 4.07\ \%$$

CAMPO MODAL (2Wo)

Diámetro Virtual de la F.O. que representa la región donde se propaga la potencia dentro de la F.O.

$$2Wo = \frac{2a.2,6\lambda}{Vc.\lambda c}$$

2Wo =Campo Modal
2a = diámetro del núcleo
λ = longitud de onda de trabajo
λc = longitud de onda de corte para Vc

CAPITULO

2

CLASIFICACION DE LAS FIBRA OPTICA

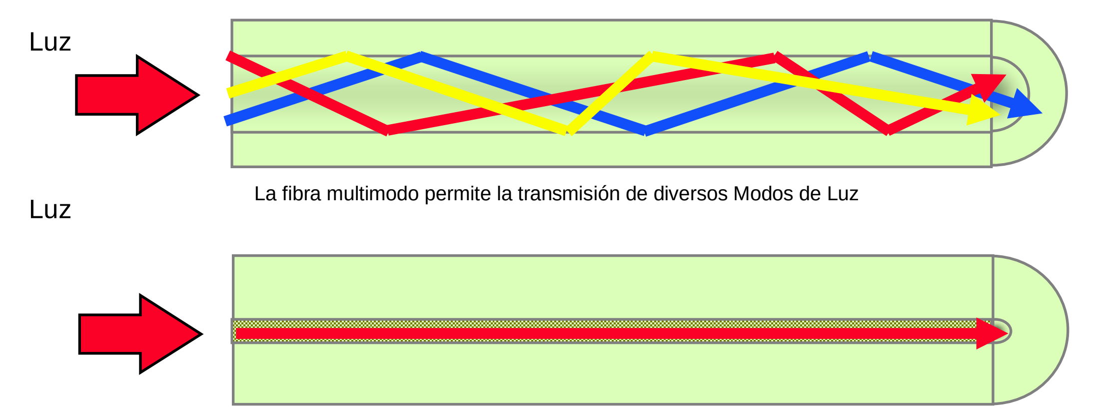
Fibra óptica Monomodo
Fibra óptica Multimodo
Dispersión de una fibra óptica
Velocidad de grupo y de fase en un medio disperso
Retardo de grupo
Parámetros de transmisión de la fibra óptica
Atenuación
Absorción
Dispersión energética lineal
Dispersión de Rayleigh
Atenuación por irregularidades periódicas
Atenuación producida por micro curvaturas y micro fisuras
Atenuación por curvado
Dispersión energética lineal
Atenuación por empalme
Pérdidas por conector
Ancho de banda
Dispersion modal
Dispersion cromatica
Dispersion material
Dispersion por guia de onda
Dispersion de modo de polarizacion

CAPITULO II

CLASIFICACION DE LA FIBRA OPTICA:

La fibra óptica podemos clasificarlo según su perfil de índice de refracción y por sus modos de propagación.

- Fibra Óptica de índice de Escalón (Tipo Multimodo)
- Fibra Óptica de índice Gradual (Tipo Multimodo)
- Fibra Óptica de Escalón (Tipo Monomodo)



La fibra multimodo permite la transmisión de diversos Modos de Luz

La fibra Monomodo permite la transmisión de un Modo de Luz

FIBRA OPTICA MONOMODO:

Modo de Luz

λ_o, λ_1

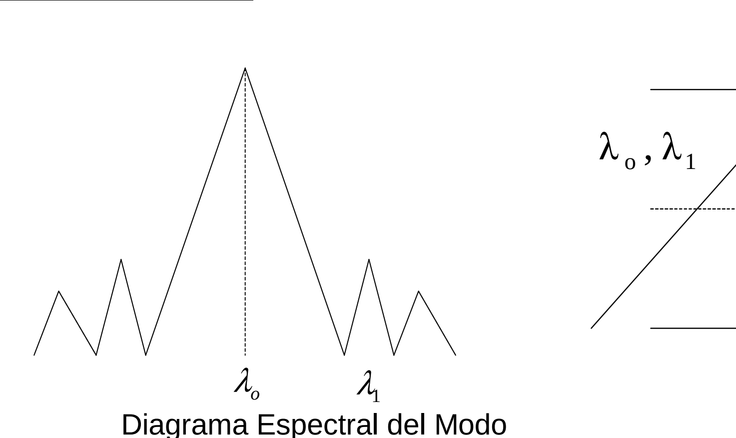


Diagrama Espectral del Modo

$$\lambda_1 > \lambda_O \quad \rightarrow \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_O} > 1$$

$$\frac{V_O}{V_1} = \frac{\dfrac{C}{n\lambda_O}}{\dfrac{C}{n\lambda_1}} = \frac{n\lambda_1}{n\lambda_O}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_O}{n\lambda_O} \rightarrow n\lambda_O = \frac{\lambda_O}{\lambda} \rightarrow \frac{V_O}{V_1} = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda}}{\frac{\lambda_O}{\lambda}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_O}$$

$$\frac{V_O}{V_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_O} \rightarrow V_O > V_1 \qquad (Dispersión\ Cromática)$$

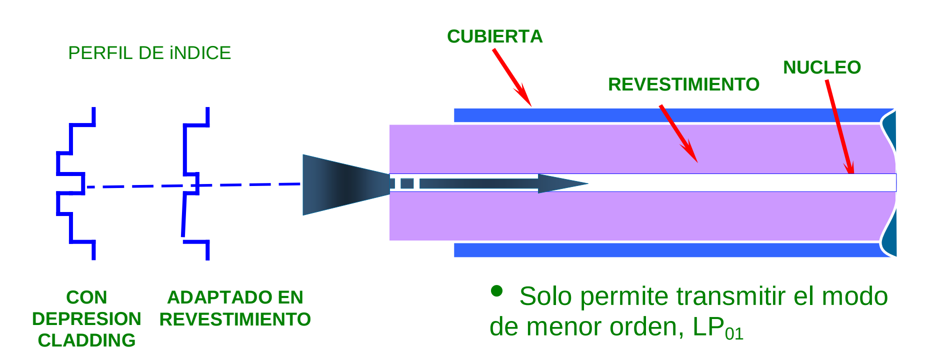
La fibra Monomodo presenta las siguientes características:

I. Mayor Ancho de Banda debido a una menor dispersión
II. Es usada solo en sistemas ópticos de 2da y 3era ventana
III. Puede ser usada para sistemas multiplexados WDM
IV. Su uso es en sistemas de larga distancia

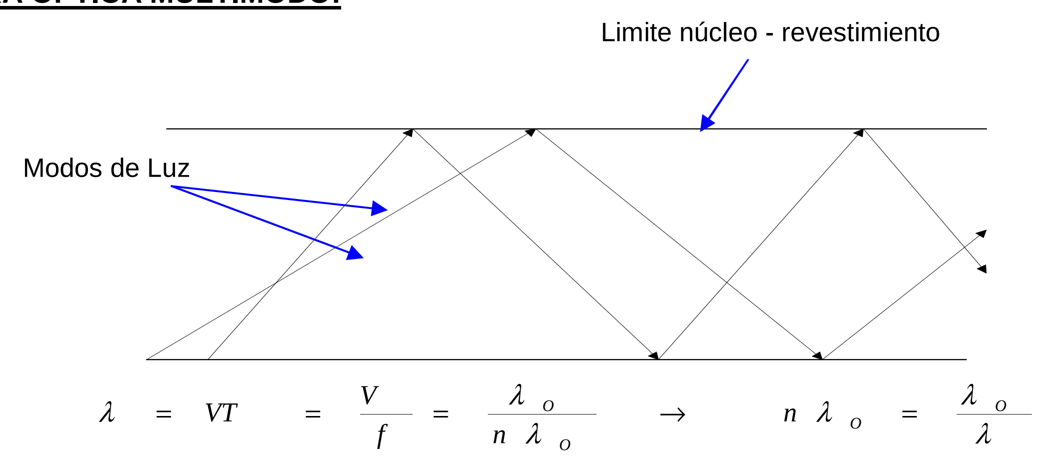
Las fibras fibra Monomodo se pueden clasificar de acuerdo a las siguientes características:

I. Por el perfil de Índice de Refracción
   a. Fibra de perfil escalón
   b. Fibra de perfil triangular
   c. Fibra de perfil W
   d. Fibra de perfil gaussiano
   e. Fibra de Perfil con depresión en Revestimiento

II. Por el tipo de Dispersión
   a. Fibra de Dispersión Normal (Rec. UIT-T G.652)
   b. Fibra de Dispersión Desplazada (Rec. UIT-T G.653)
   c. Fibra de Dispersión Plana (Rec. UIT-T G.654)
   d. Fibra de Dispersión Desplazada No Cero (Rec. UIT-T G.655)



FIBRA OPTICA MULTIMODO:



$$\lambda = VT = \frac{V}{f} = \frac{\lambda_o}{n\lambda_o} \rightarrow n\lambda_o = \frac{\lambda_o}{\lambda}$$

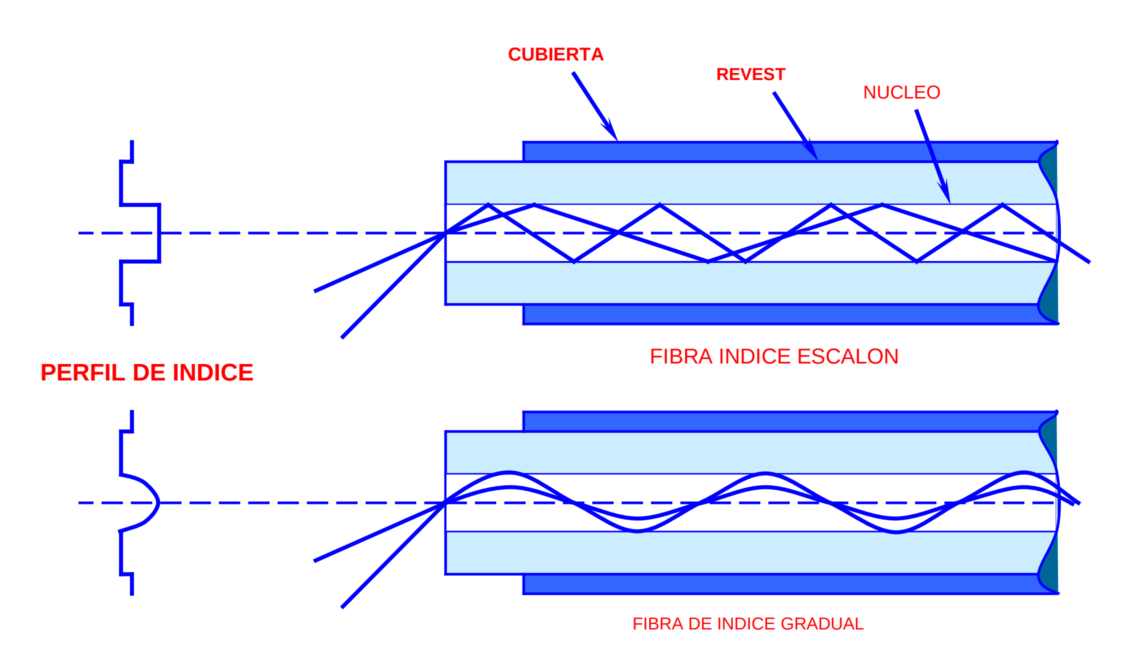
$$V_O = \frac{C}{n\lambda_O}, \quad f_O = \frac{V_O}{\lambda_O}, \quad V_1 = \frac{C}{n\lambda_1}, \quad f_1 = \frac{V_1}{\lambda_1}$$

$$\frac{f_O}{f_1} = \frac{\dfrac{C/n\lambda_O}{\lambda_O}}{\dfrac{C/n\lambda_1}{\lambda_1}} = \frac{\dfrac{C}{n\lambda_O}}{\dfrac{C}{n\lambda_1}}\,\frac{\lambda_1}{\lambda_O} = \frac{n\lambda_1\lambda_1}{n\lambda_O\lambda_O} = \frac{\dfrac{\lambda_1}{\lambda}\lambda_1}{\dfrac{\lambda_O}{\lambda}\lambda_O}$$

$$\frac{f_O}{f_1} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_O}\right)^2$$

Las Fibras ópticos multimodo se clasifican por el “Perfil de Índice” de la siguiente manera:

I. Fibra de Perfil Índice Escalón
II. Fibra de Perfil Índice Gradual



DISPERSION EN UNA FIBRA OPTICA

La Dispersión es el ensanchamiento del pulso óptico transmitido a través de toda fibra óptica, que se produce debido a los siguientes factores:

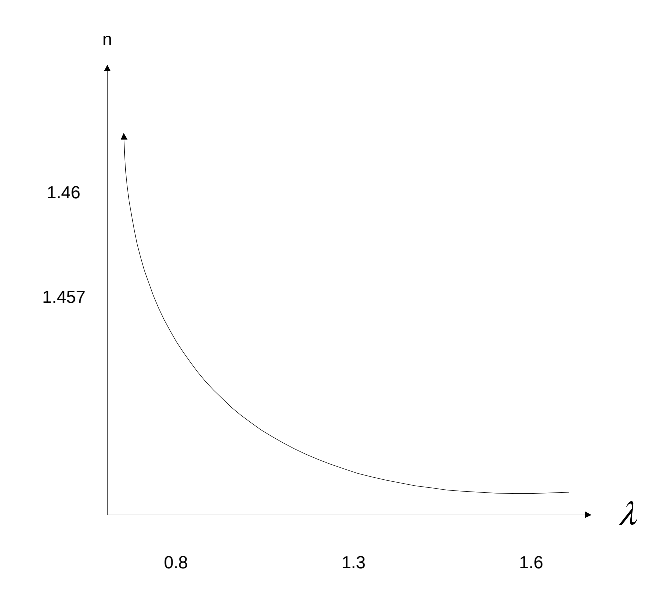
I. Variación en las características geométricas del conductor óptico
II. Incoherencia de la Fuente óptica
III. Numero de Modos que circulan el núcleo de la fibra en un instante de tiempo.

$$\Delta BW = \frac{0.187}{\sigma_T}(pseg/nm.kms)$$

Donde σ_τ representa la DISPERSION TEMPORAL generada por la fibra

VELOCIDAD DE GRUPO Y FASE EN UN MEDIO DISPERSO:

La dependencia entre el índice de refracción y la longitud de onda se describe mediante una función decreciente, o de otra manera, al aumentar la longitud de onda, el índice de refracción disminuye

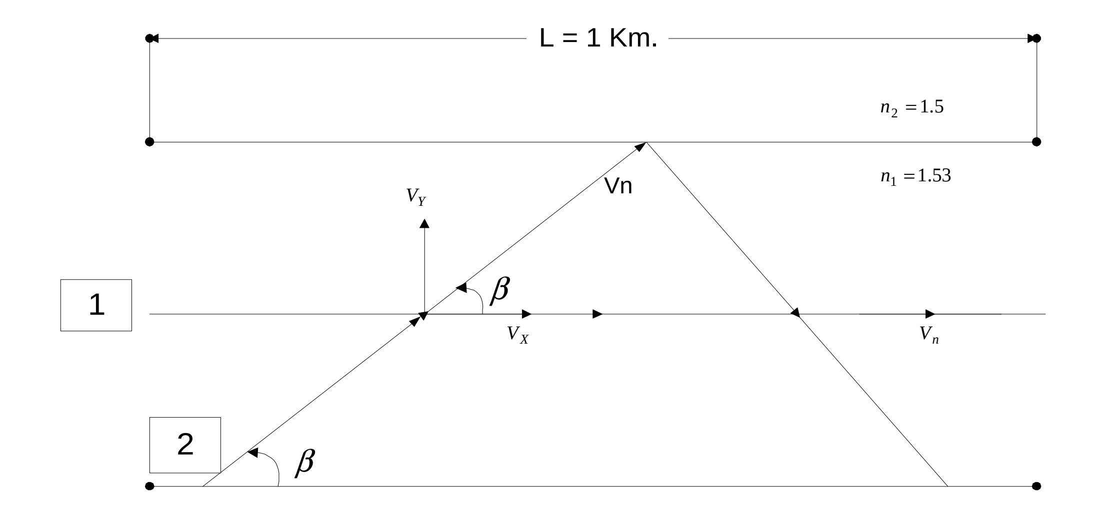


$$\lambda = \frac{\lambda_O}{n\lambda_O}, \quad k = n\lambda_O k_O, \quad V = \frac{C}{n\lambda_O}$$

$$Tg = \frac{1}{Vg} \quad \rightarrow \quad V_{GRUPAL} = \frac{C}{Ng}, \quad Ng = n\lambda_O = a_O \frac{d_n}{d\lambda_O}$$

Se tratará de transmitir un paquete de ondas de frecuencia diferente, cada frecuencia se propagará con su propia velocidad, en la llegada todos se recombinarán sin tener en cuenta los fines de transmisión.

RETARDO DE GRUPO:



Rayo 1:

$$t_1 = \frac{L}{V_n}, \quad Cos\ \beta = \frac{V_X}{V_n}, \quad t_2 = \frac{L}{V_X} = \frac{L}{V_n Cos\ \beta} = \frac{L}{V_n}\left(\frac{1}{\frac{n_2}{n_1}}\right)$$

$$\Delta t = \frac{L}{V_n}\left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right) = \frac{L}{V_n}\left(\frac{n_1 - n_2}{n_2}\right) = \frac{L}{\frac{C}{n_1}}\left(\frac{n_1 - n_2}{n_2}\right) \qquad n_1 \approx n_2$$

$$\boxed{\Delta t = \frac{L}{C} n_1 \Delta}$$

Solución:

Paso 1: $$t_1 = \frac{Ln_1}{C} = \frac{1000(1.53)}{3x10^8}$$

Paso 2: $$Cos\ \beta = \frac{n_2}{n_1} \quad \rightarrow \quad \beta = Cos^{-1}(0.98)$$

Paso 3: $$t_2 = \frac{L}{C} n_1 Sec\left(15^O\right) = \frac{1000\ (1.53)}{3x10^8} Sec\left(15^O\right)$$

Paso 4: $$t_2 - t_1 = \frac{1000}{3x10^8}(1.53)\left[Sec\left(15^O\right) - 1\right] \quad seg.$$

Problema: Considerar una longitud de fibra de 0.8 Km. hecha de sílice índice escalón. Las siguientes aplicaciones: λ_O = 1µm, ($\Delta\lambda$ / λ) = 0.12%, V = 38, n_1 = 1.453, n_2 = 1.438.

a) Calcular el ancho del pulso debido al retardo grupal.
b) Calcular el ancho del pulso debido a la dispersión del material.

Solución:

a) Ancho del pulso debido al retardo de grupo:

$$\Delta\, \text{tg} = \frac{L}{C}(n_1 - n_2)\left(1 - \frac{\pi}{V}\right) = 36.7\ nseg$$

b) Ancho del pulso debido a la dispersión del material:

$$\Delta t_m = \frac{L}{C}\frac{\Delta\lambda}{\lambda_O}\frac{\lambda^2 d^2 n_1}{d\lambda^2} = \frac{800}{3x10^8}(0.0012)(0.013) \qquad \rightarrow \qquad \Delta t_m = 0.416\ nseg.$$

La dispersión cromática no es un parámetro crítico.

PARAMETROS DE TRANSMISION DE LA FIBRA OPTICA

Para el establecimiento de un enlace usando conductores ópticos es necesario estudiar dos aspectos muy importantes relacionados a la distancia de separación sin repetidoras entre el modulo Transmisor y el modulo Receptor y a la capacidad de información que puedan transportarse entre ellos. Para el caso del conductor óptico estos parámetros se refieren a su Atenuación y al Ancho de Banda.

Por tanto desde el punto visto técnico una vez que se inyecte energía lumínica a la entrada de la fibra, estos parámetros son muy importantes, por su repercusión sobre la información impresa sobre la señal luminosa porque nos permiten tener una información de la disminución de la potencia y la deformación de los pulsos ópticos a lo largo de su longitud.
Estos dos efectos se deben a diferentes causas, distintas en su naturaleza aún dentro de cada uno de ellos.

ATENUACION:

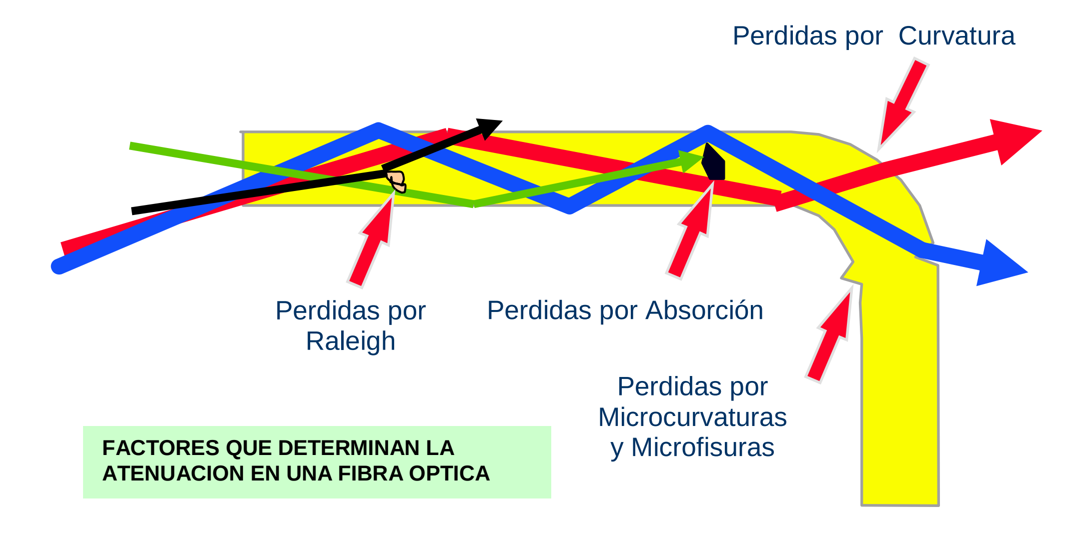
La atenuación se manifiesta, por una reducción de la potencia óptica conforme las señales viajan a lo largo de la vía de transmisión.

La ley que rige el fenómeno es:

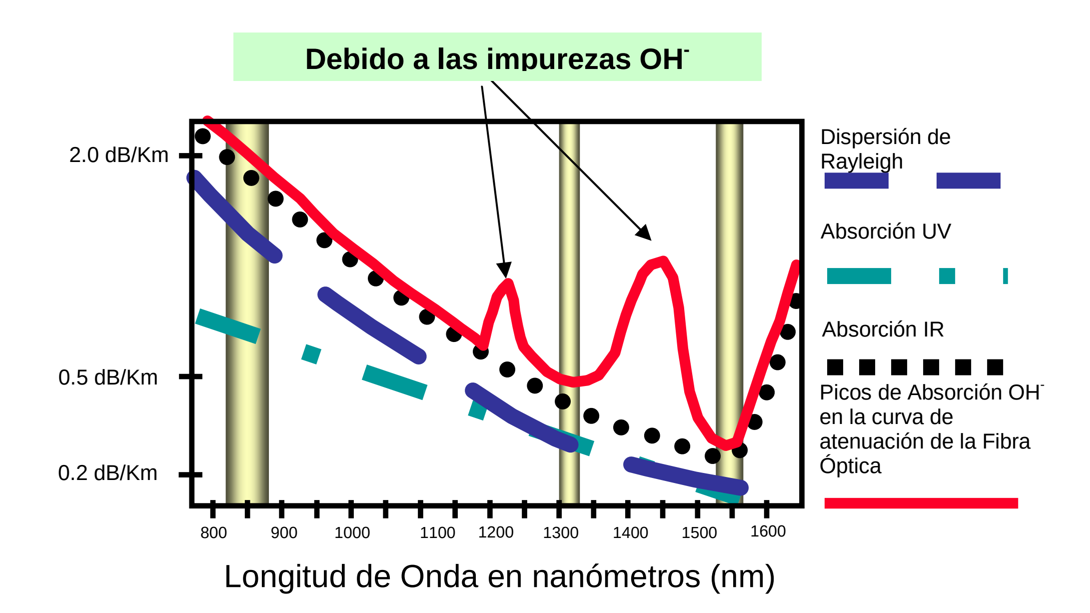
$$P(z) = P(o).10^{-\alpha.x}$$

Donde el coeficiente **α** se denomina Coeficiente de Atenuación de la fibra, medido normalmente en db/km. Este coeficiente no es constante y depende de aspectos como el material con que se construye la fibra, características geométricas y de la longitud de onda de la señal transmitida; por lo tanto existirán componentes de atenuación inherentes al material, con la cual siempre ha de contarse y que marca una limitación física y otra debida al proceso de fabricación en función del grado de pureza obtenible para los materiales, la cual puede ir reduciéndose conforme evolucionen aún más las técnicas de fabricación.

Estos aspectos se conocen como INTRINSECOS o propios de la fibra.



Las características de cómo estos factores inciden se muestran a continuación debiéndose al factor de absorción en la región infrarroja y ultravioleta del material sílice que elevan muy grandemente el valor de la atenuación, determinado de esta forma la banda de trabajo de los sistemas ópticos en base a este tipo de cristal.



Se puede observar que es posible eliminar gran parte de las impurezas del tipo ión OH^- y las ventanas segunda y tercera están puestas en comunicación. El límite teórico de Rayleigh está casi alcanzado en las regiones de interés. Esto es un claro ejemplo que la tecnología roza casi los óptimos teóricos.

Por otra parte se está investigando sobre otras fibras que exhiben en sus composiciones materiales distintos de la sílice y los silicatos, y en las experiencias de laboratorio efectuadas muestran atenuaciones realmente sorprendentes por lo reducido de sus factores de atenuación.

Como todos los componentes lineales del efecto de Atenuación participan en forma logarítmica, puede considerarse que los factores parciales de atenuación, expresados en decibelios, se suma, de forma que:

$$\alpha_{FACT.INTRINS} = \alpha_{ABSORCION} + \alpha_{DISP.RAYLEIGH} + \alpha_{IRREG.PERIOD.} + \alpha_{MICROCURV} + \alpha_{CURV.} + \alpha_{RAMAN} + \alpha_{BRILLOUIN}$$

ABSORCION:

Este fenómeno deriva de acusas diferentes dependiendo de la región de la región del espectro donde se muestra.

Existe una absorción intrínseca propia del material básico constituyente de la fibra, tanto correspondiente al sustrato original (sílice, vidrios silicatos, etc.) como a las impurezas añadidas expresamente para conseguir los perfiles de índices proyectados, y otra absorción extrínseca debida a las impurezas indeseadas pero arrastradas, o inducidas a lo largo del proceso de fabricación.

$$\alpha_{ABSORCION} = \alpha_{UV,S} + \alpha_{UV,I} + \alpha_{IR,S} + \alpha_{IR,I} + \alpha_{IR,C}$$

Donde el significado de cada término es el siguiente:

* ABSORCIONES INTRINSECAS

$\alpha_{UV,S}$ = Corresponde al material que constituye el sustrato, es decir la sílice y a la región ultravioleta

$\alpha_{UV,I}$ = Por las impurezas añadidas expresamente, y en la región ultravioleta.

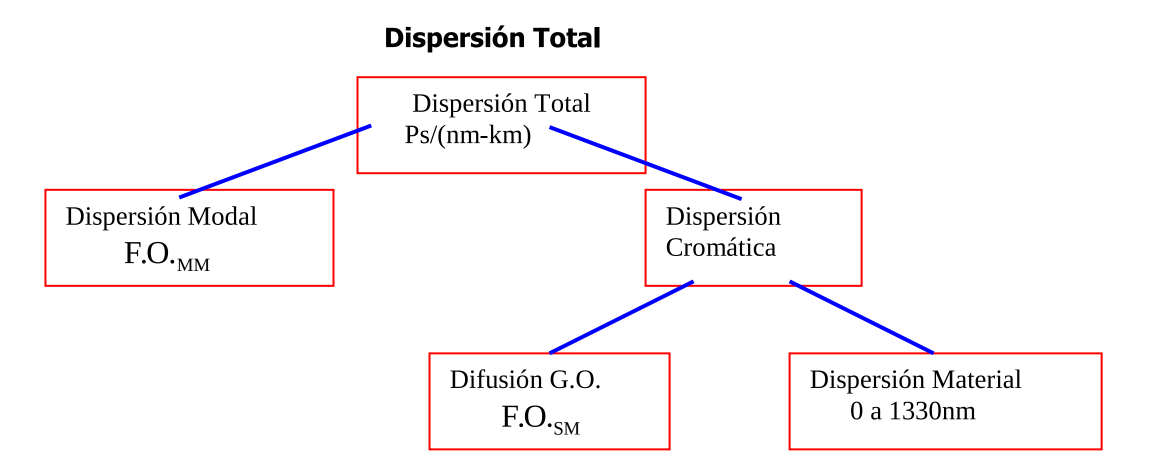
$\alpha_{IR,S}$ = Absorción en la zona infrarroja ocasionadas por el sustrato.

$\alpha_{IR,I}$ = Absorción en la zona infrarroja, por las impurezas añadidas expresamente.

* ABSORCIONES EXTRINSECAS

$\alpha_{IR,C}$ = Absorción en la zona infrarroja debido a los contaminantes entrometidos, principalmente al ión OH^- y los metales de transición, dependiendo de los materiales constituyentes de la fibra.

DISPERSION ENERGETICA LINEAL



La causa del fenómeno está en la transferencia de energía de unos modos a otros ante la presencia de irregularidades del tamaño relacionado con la longitud de onda de la radiación transmitida. Los modos receptores de energía son siempre de mayor orden, perteneciendo algunos de ellos al conjunto de modos de fuga de la fibra, con lo cual el efecto de merma de la energía en tránsito por el núcleo es evidente.

El efecto recibe también el nombre de “Esparcimiento” y el menos afortunado de difusión. Este tipo de dispersión es directamente proporcional respecto a la longitud de la fibra óptica.

DISPERSION DE RAYLEIGH

Este efecto se debe a pequeñas fluctuaciones de la densidad específica del material en el núcleo de la fibra y que causa la constitución de pequeñas zonas donde se presenta una variación microscópica del índice de refracción.

Aunque al parecer en el fenómeno existen diversas causas de naturaleza diferente, se engloba con el nombre genérico de Dispersión de Rayleigh. Incluso el material constitutivo del sustrato considerado puro da lugar en la práctica a dispersión energética por alteraciones localizadas en su densidad por imperfecciones de cristalización.

$$\alpha_{RAYLEIGH} = \alpha_{d,d} + \alpha_{d,i}$$

donde:

$\alpha_{d,d}$ = Coeficiente de atenuación por dispersión debida a variaciones de la densidad del material.

$\alpha_{d,i}$ = Coeficiente de atenuación por dispersión debido a las impurezas añadidas.

ATENUACION POR IRREGULARIDADES PERIODICAS

Existe otro efecto dispersivo derivado de la separación o período con que aquellos se muestran. La consecuencia inmediata también está en el acoplo de unos a otros modos.

Supongamos que uno de los parámetros de la fibra, idealmente uniforme, muestra desviaciones respecto al valor previsto con una cierta periodicidad que designamos Pi (estas variaciones de un parámetro pueden ser modificaciones del índice, o una diferencia en el diámetro del núcleo a lo largo del eje de la fibra con respecto a la dimensión ideal, etc.). Pues bien, se verifica que puede darse un fuerte acoplo entre dos modos si la longitud de onda de batido correspondiente a ambos coincide con el período de la irregularidad. Es decir, si λ_1 y λ_2 son longitudes de onda pertenecientes a los modos en cuestión, habrá mezcla modal si:

$$\frac{1}{P_i} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}$$

En función del orden de los modos, fundamentalmente del que cede la energía, el modo receptor seguirá guiado o transformado en modo de fuga. En las fibras normalmente empleadas el efecto adverso solamente se da cuando el período de las imperfecciones es menor que una cierta longitud crítica definida por:

$$L_C = \frac{4a}{\sqrt{\frac{n_1 - n_2}{n_1}}}$$

Esta distancia resulta, como vemos, independiente de la longitud de onda de la luz. Los valores de atenuación originados son difíciles de prever dada la variedad de posibles causas implicadas.

ATENUACION PRODUCIDA POR MICROCURVATURAS Y MICROFISURAS

Las micro curvaturas consisten en pequeñas desviaciones y tortuosidades que por diversas causas presenta el eje de la fibra óptica. Su distribución es aleatoria pero en la práctica se observa la ocurrencia de determinadas componentes espectrales equivalentes a una cierta periodicidad (como si la separación entre las microcurvaturas tuviera la distribución de un ruido con algunas frecuencias dominantes en el espectro). Por este motivo se origina un efecto de acoplo de modos.

La causa de este tipo de perdidas es muy concreta y puede originar modificaciones de la atenuación de una fibra cableada respecto a los valores teóricos esperados que pueden superar todas las previsiones. En cambio, con un adecuado control de los procesos de fabricación, enfundado de la cubierta y cableado (incluso en la instalación) de la fibra óptica se consigue mantener el coeficiente adicional de perdidas debidas a micro curvaturas dentro de los limites tolerables.

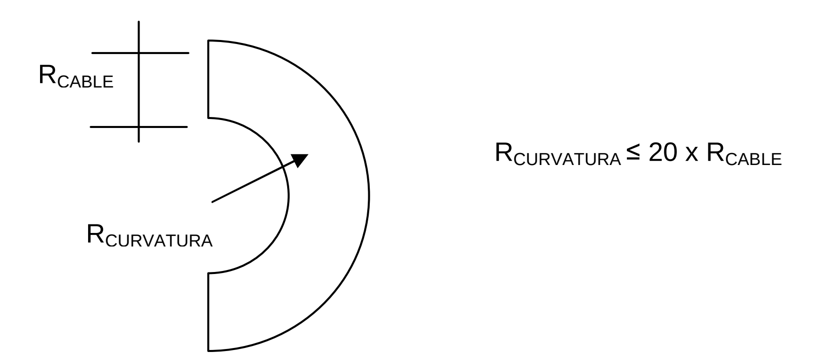
Las micro fisuras en cambio se presentan por los procesos de estiramiento de la Preforma de la Fibra en la obtención del conductor óptico final, que en algunos casos no se pueden detectar inicialmente en el proceso de control de fabricación pero que si se hacen notorios cuando la fibra queda expuesta al agua o humedad.

ATENUACION POR CURVADO

Se trata de un efecto que no va a estar presente en una instalación correctamente efectuada, ya que siempre habrá un medio de evitarlo, pues de lo contrario el resultado en cuanto a la transmisión puede ser muy catastrófico.

Ciertamente si el radio de curvatura se hace inferior a determinado valor mínimo, que depende únicamente del diámetro del núcleo, la atenuación adicionalmente introducida crece de manera exponencial

En los cables se puede indicar que:



DISPERSION ENERGETICA ALINEAL

En los fenómenos de dispersión energética lineal se daba por supuesto de manera implícita que el comportamiento de la fibra era lineal, y por tanto los efectos eran directamente proporcionales a las causas.

Ahora bien, en el caso de que el nivel de potencia óptica transportada por la fibra sea muy intenso, el medio transmisor deja de comportarse como un elemento lineal, y aparecerán modos cuyas componentes espectrales no estaban presentes en la señal de entrada. Se trata, pues de una nueva modalidad de acoplo de modos en la que la potencia transportada condiciona la magnitud del fenómeno.

Esencialmente se debe a un fenómeno de interacción entre la radiación transportada y el material, donde se producen unos efectos de radiación estimulada. Los más interesantes son los de Brillouin y Raman, que aunque semejantes en los resultados presentan umbrales de potencia en orden de magnitud diferentes. El umbral de potencia para ocurrencia de la dispersión estimulada de Brillouin SBS, en una fibra monomodo de sílice excitada con luz monocromática tiene por magnitud:

$$SBS = 8x10^{-5}\left(\frac{\alpha}{\Delta\lambda(\mu m)}\right)watts$$

Donde $\Delta\lambda$ representa el ancho de banda espectral de la luz transmitida expresada en μm, medido a 3 dB ópticos (mitad de potencia) por debajo del valor máximo.

Para que se produzca la dispersión estimulada de Raman, el nivel de potencia óptica SRS, deberá estar más de dos órdenes de magnitud por encima del valor definido por la relación anterior.

En el caso de las fibras multimodo, los umbrales adquieren valores comparativos mayores de acuerdo con el tamaño del núcleo de las fibras. A continuación se mostrará una tabla comparativa de los umbrales de dispersión estimulada SBS y SRS en el caso de dos fibras de SiO_2, una fibra monomodo con diámetro de núcleo igual a 10 μm y la segunda multimodo con 50 μm, para el mismo parámetro.

UMBRALES DE DISPERSION ESTIMULADA PARA DOS TIPOS DE FIBRA

UMBRAL DE POTENCIA	FIBRA MONOMODO 2a = 10 μ m	FIBRA MULTIMODO 2a = 50 μ m
De Brillouin	9,8 mW	440 mW (SBS)
De Raman	3,3 W	150 W

Existen para el caso de los Sistemas ópticos otros factores conocidos como EXTRINSECOS que deben de ser considerados en la Atenuación Total, que representa la cantidad de perdidas totales entre el punto de inyección de potencia a la entrada de la fibra y el receptor óptico. Estos factores son:

Dispersión	Tipo de F.O.		
	S.M.	M.M.	
		Gradual	Ecalonada
Modal	0	0.5(ηs / Km.).	50(ηs / Km.).
cromática	60 (ρs / ηm $_x$ Km.).	100 (ρs / ηm $_x$ Km.).	60 (ρs / ηm $_x$ Km.).

ATENUACION POR EMPALME

Esta atenuación representa las perdidas por la unión entre dos extremos de fibra óptica; dependiendo el valor de acuerdo al tipo de técnica utilizada. Las técnicas usadas son:

a.- Atenuación por Empalme usando el método de Arco Fusión.- En este método las fibras son unidas mediante un proceso de fusión, para lo cual se utiliza un equipo de empalme por arco fusión.

$\alpha_{ARCOFUSION} \leq 0.2dB$ (Valor Normado por UIT – T)

$\alpha_{ARCOFUSION} \leq 0.15dB$ (Valor normado por Telefónica en el Perú para su red de CATV)

$\alpha_{ARCOFUSION} \leq 0.10dB$ (Valor normado por IMPSAT en el Perú para su sistema de Cable Submarino)

b.- Atenuación por Empalme Mecánico.- Este método es usado en los bastidores terminales u ODF y FDU de las Redes de Telecomunicaciones; para lo cual se usan conectores que permiten que dos fibras sean enfrentadas a través de sus caras transversales, produciéndose una continuidad de las fibras por un simple contacto. En la actualidad existen una variedad de conectores y técnicas que logran dicha unión no encontrándose normalizado.

Por lo general en la actualidad si se usan conectores con perdidas mínimas en un enlace de gran capacidad se puede indicar lo siguiente:

$\alpha_{MECANICO} = 2(\alpha_{CONECTOR}) \geq 0.4dB$ (Para conectores de bajas perdidas de potencia)

PERDIDAS POR CONECTOR

Asimismo se deben considerar las pérdidas de potencia que se tienen por cada conector extremo que conecta la fibra con los dispositivos ópticos. El valor es independiente del tipo de conector:

Perdida x conector ≥ 0.2 dB

Por tanto la Atenuación por FACTORES EXTRINSECOS queda como sigue:

$$\alpha_{EXTRINSECO\ S} = \alpha_{EMPALME} + 2\alpha_{CONECTOR}$$

Finalmente se puede concluir que:

$$\alpha_{TOTAL} = \alpha_{INTRINSECOS} + \alpha_{EXTRINSECOS}$$

ANCHO DE BANDA:

Como se ha venido explicando; la señal que viaja por la fibra está constitutita por agrupamientos o paquetes de energía que denominamos “modos”. Cada modo posee una disposición propia dentro de la guía y por lo tanto el camino recorrido será en general diferente a los demás.

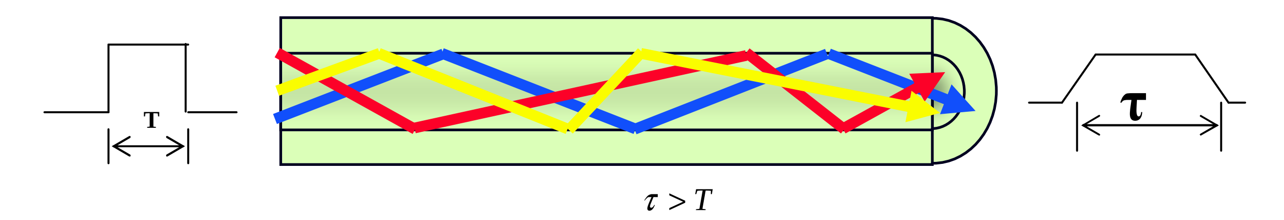
El efecto resultante sobre un impulso de señal, perfectamente definido en el tiempo cuando penetra en la fibra, será de una cierta desintegración, puesto que el intervalo de transito por el medio transmisor será diferente para cada una de las fracciones constituyentes. La duración por tanto, del impulso a la salida de la fibra será alargada respecto al valor que tenia al momento de la entrada.

El efecto resultante recibe el nombre de “DISPERSION TEMPORAL”. Las causas de este ensanchamiento del pulso en el extremo de salida son tres:

a. Dispersión debida a la diferente distribución de los modos y al número de modos que circulan por el interior de la fibra. A esta dispersión se le conoce como DISPERSION MODAL o INTERMODAL.

b. Dispersión en base a la No cromaticidad del espectro de cada modo. Denominada DISPERSION CROMATICA o INTRAMODAL. Dentro de está causa se pueden evidenciar dos agentes diferentes:
    I. La longitud de onda que actúa a través del índice de refracción del material constituyente del núcleo de la fibra: DISPERSION DEL MATERIAL.
    II. La longitud de onda actuando a través de otros parámetros distintos al índice, como los que definen la geometría de la fibra: DISPERSION POR EFECTO DE LA GUIA DE ONDAS.

c. Dispersión debida a un desfasaje entre las componentes energéticas eléctrica y magnética de un modo debida a la geometría de la fibra: DISPERSION DE MODO DE POLARIZACION



$\tau > T$

En consecuencia si denominamos σ_τ al ensanchamiento global y σ_M , σ_C y σ_{PMD} a los que corresponden a los efectos de la dispersión modal, cromática y de modo de polarización; este valor se puede escribir de la siguiente forma:

$$\sigma_\tau^2 = \sigma_M^2 + \sigma_C^2 + \sigma_{PMD}^2$$

Donde a su vez, debido a que presenta un agente común las dispersiones de material y de guía de ondas, se verifica la expresión simple:

$$\sigma_C = \sigma_{MAT} + \sigma_{G.O}$$

DISPERSION MODAL
De acuerdo a la teoría de rayos que es suficientemente precisa en la mayor parte de los casos de fibras multimodo de índice escalón, la frecuencia normalizada de corte V es relativamente grande.

La expresión que permite la determinación de la dispersión modal para una fibra multimodo de perfil índice escalón, deducida a través de la teoría electromagnética, es como sigue:

$$\sigma_M\left(I.E\right) = \frac{1}{C}\left(n_1 - n_2\right)\left(1 - \frac{2}{V}\right) \cong \frac{L}{2C}\left[\frac{\left(A.N\right)^2}{n_2}\right]$$

Para el caso de las fibras multimodo de perfil índice gradual el efecto de autoenfoque reduce muy sustantivamente las consecuencias de la dispersión modal. De acuerdo con este valor óptimo se obtiene para la dispersión modal de una fibra de perfil de índice gradual la siguiente expresión:

$$\sigma_M\left(I.G\right)) = \frac{n_1}{8C}\Delta^2$$

Donde C representa el valor de la velocidad de la luz en el vació y Δ el valor de la Diferencia Relativa de Índices.

DISPERSION CROMATICA
Si nos imaginemos un medio conductor reradiaciones electromagnéticas cuyo índice de refracción es n(r). Se dice que este medio posee un comportamiento dispersivo al paso de la luz si:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \neq 0$$

Analizando está relación observamos que existen velocidades diferentes para cada longitud de onda en transito por el material, lo cual significa una dispersión de los frentes de onda. En lo que sigue vamos a ignorar la existencia de la dispersión modal, o bien, suponer que existe un solo modo de propagación integrado por diversas longitudes de onda.

El tiempo necesario que tarda una radiación en cubrir una cierta longitud L será:

$$t = \frac{L}{N_f} = L\frac{\partial \beta}{\partial \omega_L} = -\frac{\lambda}{\omega_L}\left(\frac{\partial \beta}{\partial \lambda}\right)$$

Donde: N_f = Número de fotones
β = Constante de fase de la radiación de luz.
ω_L = Frecuencia angular correspondiente a la radiación
λ = Longitud de onda de la señal radiada.

Si consideramos que a lo largo del medio de transmisión viaja un impulso de luz no monocromática de duración muy pequeña en su comienzo, el efecto de ensanchamiento debido al ancho espectral de la radiación, en el supuesto que exista coherencia, es:

$$\sigma_{CROMATICA} = \frac{dt}{d\lambda} = -\frac{L}{2\pi C}\left[2\lambda\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} + \lambda^2\frac{\partial^2\beta}{\partial\lambda^2}\right]$$

Si la radiación es no coherente será necesario multiplicar la expresión anterior por $\Delta\lambda$, siendo este último factor el Ancho espectral de las radiaciones.

DISPERSION DE MATERIAL
Fundamentalmente este tipo de dispersión se debe a la incoherencia de la fuente óptica; por lo tanto podemos decir que el ensanchamiento para el impulso, al cabo de la longitud L es:

$$\frac{dt}{d\lambda} = -\frac{L}{C}\left[\lambda\frac{\partial^2 n}{\partial\lambda^2}\right]$$

Si se tiene en cuenta la no coherencia de la radiación emitida por la fuente expresada por $\Delta\lambda$ el ensanchamiento del pulso será:

$$\sigma_{MATERIAL} = -\frac{L}{C}\Delta\lambda.\lambda.\frac{\partial^2 n}{d\lambda^2}$$

Esta expresión normalmente se presenta de la forma:

$$\sigma_{MATERIAL}(nseg) = \frac{L}{2.35}\Delta\lambda.M(\lambda)$$

Expresión que normalmente se presenta de la forma:

$$\sigma_{MATERIAL}(nseg.) = \frac{L}{2.35}.\Delta\lambda.M(\lambda)$$

Siendo M (λ) el Coeficiente de Dispersión de Material y que normalmente es expresado en términos de nesg/km.nm. En las fibra normalmente sucede que M (λ) se anula en el entorno entre 1.3 y 1.6 μm, dependiendo de la composición de la fibra, razón por la cual la dispersión del material igualmente toma valor cero.

DISPERSION POR GUIA DE ONDA
Supongamos una fibra por la que se propaga un impulso de luz que implica a un modo cuyo factor de propagación esβ. Este parámetro viene definido por las características de la radiación y por las del medio transmisor. El impulso de luz resultará afectado por la dispersión si el segundo sumando de la dispersión cromática no es nulo, es decir:

$$\sigma_{CROMATICA} = \frac{dt}{d\lambda} = -\frac{L}{2\pi C}\left[2\lambda\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} + \lambda^2\frac{\partial^2\beta}{\partial\lambda^2}\right]$$

$$\frac{\partial^2\beta}{\partial\lambda^2} \neq 0$$

En este caso no es propiamente el índice de refracción el responsable de la dispersión, sino de la dependencia de β, y por tanto de la frecuencia de corte V, con la longitud de onda de la señal.

El valor correspondiente de la dispersión es ahora:

$$\sigma_{G.O}(nseg) = -\frac{L}{2.35}.\Delta\lambda.G(\lambda)$$

Aquí el factor G (λ) representa al coeficiente de dispersión debida a la guía de onda, dado por:

$$G(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi^2 C.a^2 n_1} \quad \text{(nseg/Km.nm)}$$

En esta expresión la velocidad de la luz debe de expresarse en Km/nseg y las demás magnitudes en μm. Se observa que las dispersiones de material y de guía de onda van afectadas por signos contrarios. Este hecho sugiere la posibilidad de diseñar la fibra de forma que se cancelen mutuamente. Dicho interés radica más en las fibras de tipo monomodo, porque al no existir otra causa podríamos tener la posibilidad de tener un medio sin dispersión y con un Ancho de Banda potencialmente infinito.

DISPERSION DE MODO DE POLARIZACION (PMD)

Existe otro tipo de dispersión conocido como Dispersión del Perfil de la fibra D_P , este determina valores muy pequeños en las fibras que no son significativos y que dependen del tipo de perfil de índice de refracción de las fibras y de la geometría de los conductores. Para el caso de las fibras multimodo no se toman en cuenta debido a que los demás factores prácticamente determinan el valor de la DISPERSION TEMPORAL y en el caso de las fibras monomodo se considera cuando las longitudes de los tramos de fibra son muy grandes (mayores a los 50Kms.) alcanzando valores menores a 0.5 pseg/nm.Km . También se le conoce como Dispersión de Modo de Polarización.

Es usual explicar el ancho de banda en GHz – Km. El significado de tal expresión es "El ancho de banda por unidad de longitud". Para fibras multimodo índice gradual:

$$B(GHz) = \frac{0.187}{\sqrt{\sigma_{MAT}^2 + \sigma_{MODAL}^2}}$$

$$\sigma_{MO}\, xL^8 \le \frac{0.187}{B} \quad \rightarrow \quad L^8 \le \frac{0.187}{B\sigma_{MO}} \quad \rightarrow \quad L \le \left(\frac{0.187}{B\sigma_{MO}}\right)^{\frac{1}{8}}$$

σ_{MO}: Valor de dispersión modal por kilómetro.

Para fibras monomodo:

$$B = \frac{0.187}{\sigma_{MAT} + \sigma_{GO}} = \frac{0.44}{\Delta\lambda L\left|M(\lambda) - G(\lambda)\right|}$$

$$K\Delta L_{MAX} \le \frac{0.187}{B} \quad \rightarrow \quad L_{MAX} \le \frac{0.187}{BK\Delta}$$

K: Coeficiente global de dispersión cromática.
Δ : Anchura espectral.

CAPITULO

3

FRABRICACION DE LA FIBRA OPTICA

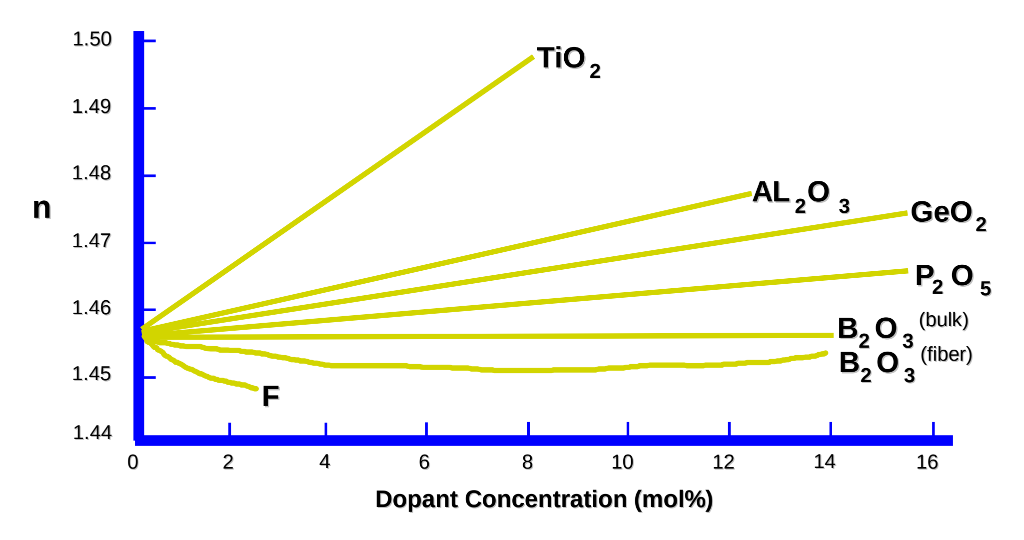
Materiales para la fabricación
Procesos de fabricación: MCVD, VAD, OVD, PCVD
Proceso de estirado

CAPITULO III

FABRICACION DE FIBRA OPTICA:

Materiales para la fabricación de fibras ópticas:
El material utilizado principalmente para fabricar las fibras ópticas es el dióxido de silicio, cuarzo o sílice. Durante el proceso de fabricación se incorporan al dióxido de silicio los aditivos de dopado utilizados para modificar el valor de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento de la fibra óptica.

El dióxido de silicio en el núcleo de la fibra óptica esta dopado con aditivos de boro y flúor para aumentar el valor del índice de refracción. En el revestimiento de la fibra óptica el dióxido de silicio esta dopado con aditivos de germanio y fósforo para disminuir el valor del índice de refracción.
Para la fabricación de las fibras ópticas se requieren materiales de muy alta transparencia óptica por lo que el dióxido de silicio utilizado se ha de obtener en un estado purísimo. La utilización del dióxido de silicio se fundamenta en la propiedad de su obtención mediante un proceso químico de deposición, que garantiza su alto grado de pureza.
En este proceso se obtiene el dióxido de silicio, tras pasar por una fase gaseosa en la que se añaden los aditivos de dopado, lo que garantiza una mezcla homogénea del dióxido de silicio y de los aditivos de dopado.
El cuarzo o la arena de sílice obtenibles por medios naturales no son válidos como dióxido de silicio para ser utilizado en la fabricación de fibras ópticas. El proceso consiste en obtener inicialmente el tetracloruro de silicio a partir del cuarzo, mediante su reducción con carbón y posterior transformación con cloro. A continuación y tras de una destilación fraccionada, se obtiene de forma ultrapura el tetracloruro de silicio, mientras que los cloruros metálicos quedan en el proceso de destilación. El paso siguiente es un proceso químico de deposición del tetracloruro de silicio para obtener el dióxido de silicio puro que es la materia prima necesaria para la fabricación de las fibras ópticas.



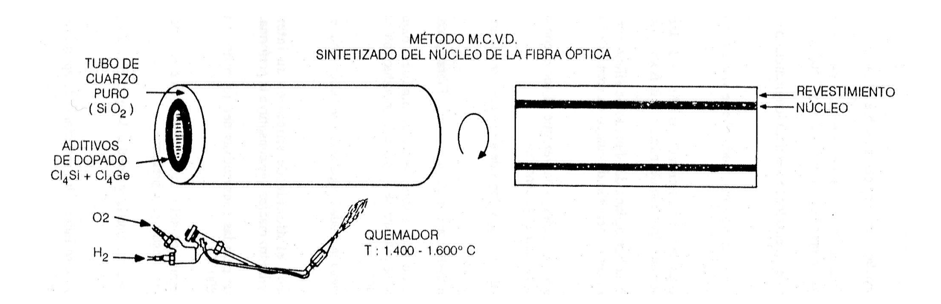
Procesos de Fabricación de la preforma:
La preforma es el cilindro macizo de dióxido de silicio dopado que sirve como materia prima para la elaboración de la fibra óptica.
El paso siguiente para la elaboración de las fibras ópticas, tal como las conocemos una vez fabricadas, es la extrusión de la preforma.
Algunos de los procesos utilizados para fabricar la preforma son los siguientes:

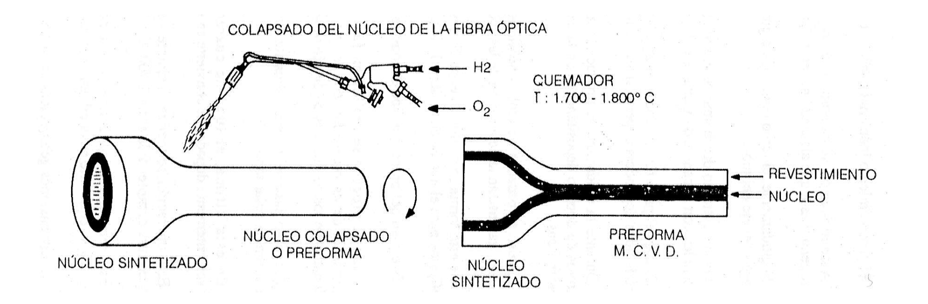
- MCVD Modified Chemical Vapor Deposition.
- VAD Vapor Axial Deposition
- OVD Outside Vapor Deposition
- PCVD Plasma Chemical Vapor Deposition

Estos cuatro procesos se describen a continuación brevemente.

(I) Método MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition)
Este método fue desarrollado inicialmente por Corning Glass y modificado posteriormente por los laboratorios de Bell Telephone para su uso industrial. Para la fabricación de la preforma se parte de un tubo de cuarzo puro, en cuyo interior se deposita una serie de capas concéntricas, constituidas por la mezcla ya descrita anteriormente de dióxido de silicio y aditivos de dopado. Estas capas concéntricas, depositadas internamente, constituirían el núcleo de la fibra óptica.
El procedimiento industrial consiste en instalar el tubo de cuarzo sobre un torno.
A continuación se calienta el tubo de cuarzo, mediante un quemador de oxígeno e hidrógeno, hasta que alcanza una temperatura comprendida entre 1400 ℃ y 1600 ℃.
Seguidamente, el torno comienza a girar y el quemador se desplaza longitudinalmente a lo largo del eje del tubo. Por un extremo del mismo se introducen los aditivos de dopado que se van a necesitar mezclados con la cantidad exacta de oxígeno.
Este proceso es el paso fundamental del proceso pues de la proporción de los aditivos de dopado introducidos dependerá el perfil final del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Durante la oxidación, se produce la mezcla homogénea del dióxido de silicio con los aditivos de dopado depositándose en la cara interior del tubo de cuarzo en forma de capas concéntricas.
Sucesivas pasadas en ambos sentidos del quemador, a la vez que el torno continua girando, garantizan la deposición de las sucesivas capas concéntricas. De esta forma se conforma el perfil deseado con los valores de los índices de refracción prefijados para el núcleo de la fibra óptica.
Este paso del proceso recibe el nombre de Sinterización del núcleo de la fibra óptica. Todo el proceso se realiza en fábrica de forma totalmente automática, bajo la supervisión de un computador, con lo que en la práctica se limita a la introducción en el computador de los parámetros de diseño deseados.
El último paso del proceso consiste, una vez realizada la operación de deposición, en la operación de colapsado.
En esta última, el tubo de cuarzo con el dióxido de silicio en su interior convenientemente dopado, se convierte en el cilindro macizo que constituye la preforma. Esta operación se realiza mediante varias pasadas consecutivas del quemador a una temperatura comprendida entre 1700 ℃ y 1800 ℃.
Esta temperatura garantiza el reblandecimiento del cuarzo con lo que el tubo se colapsa y se convierte en el cilindro macizo que constituye la preforma.
Las dimensiones geométricas de la preforma son una longitud útil de aprox. 1 mt. con un diámetro exterior de 1 cm.

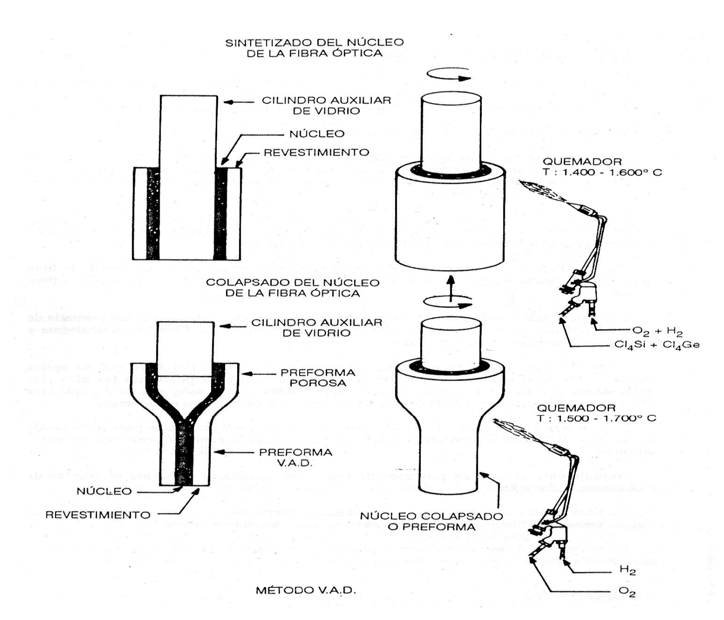
En la figura se esquematiza el método y se indica los materiales de aportación y aditivos de dopado que intervienen en el proceso.





(II) Método VAD (Vapor Axial Deposition)

Este método esta basado en una técnica desarrollada por NTT (Nippon Telephone and Telegraph) y es empleada por las compañías japonesas fabricantes de Fibras Ópticas.
Las materias primas empleadas son las mismas que en la técnica MCVD y la diferencia entre ambas técnicas radica en que mientras en la técnica MCVD tan solo se depositaba el núcleo de la fibra óptica, en la técnica VAD se deposita tanto el núcleo de la fibra como su revestimiento.
Para la fabricación de la preforma se parte de un cilindro de vidrio auxiliar que servirá de soporte para iniciar la operación. Los materiales se van depositando ordenadamente a partir del extremo del cilindro auxiliar con lo que la “preforma porosa” va creciendo axialmente sobre dicho cilindro auxiliar.
Dado que en esta técnica se deposita tanto el núcleo de la fibra óptica como su revestimiento u operación de síntesis del núcleo y del revestimiento, debe cuidarse que la zona de deposición axial o núcleo se deposite comparativamente más dióxido de germanio que en la periferia, lo que se realiza como los otros métodos mediante la introducción en el computador de los parámetros de diseño pertinentes.
La preforma porosa conforme su tasa de crecimiento, va siendo desprendida del cilindro auxiliar de vidrio. Con este método se pueden obtener preformas en forma de varillas comparativamente más largas que con el proceso anteriormente descrito.
El último paso consiste en la operación de colapsado, en la cual la preforma porosa es sometida a una temperatura comprendida entre 1500 °C y 1700 °C que garantiza el reblandecimiento del cuarzo.
La preforma porosa, hueca en su interior se colapsa convirtiéndose en el cilindro macizo y transparente que constituye la preforma.
Este proceso presenta las ventajas frente al MCVD de que permite obtener preformas con mayor diámetro y mayor longitud a la par que precisa un menor aporte energético.

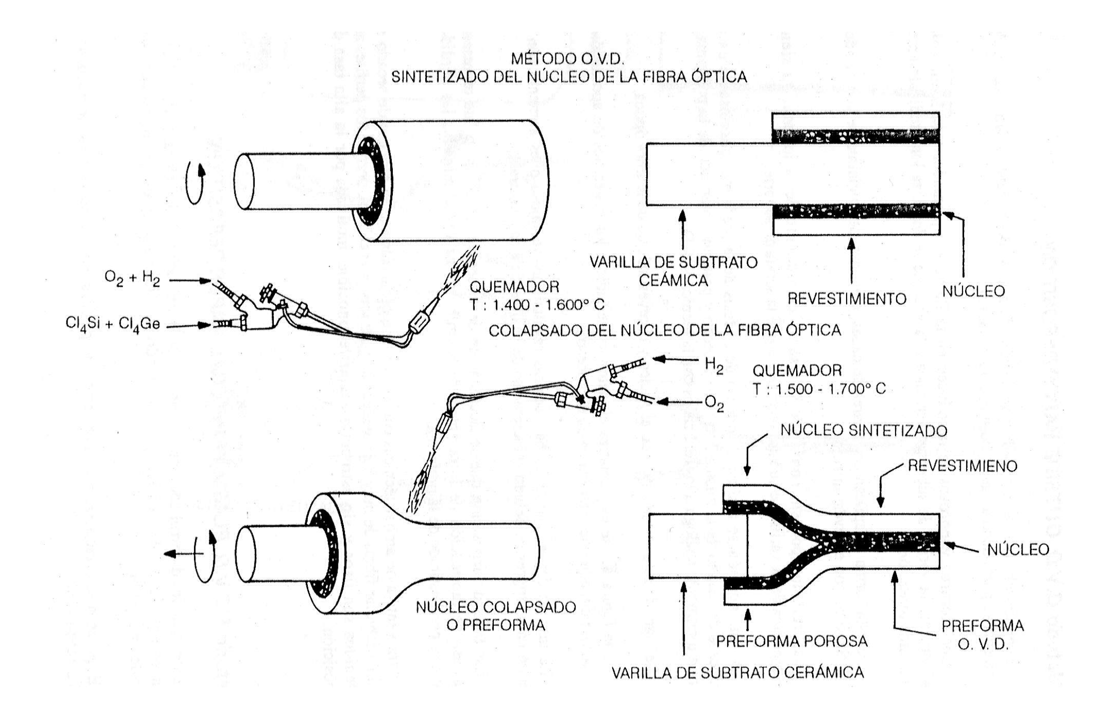


Su inconveniente es la mayor sofisticación tecnológica en los equipos necesarios para su realización. En la figura se esquematiza el método y se indican los materiales de aportación y aditivos de dopado que intervienen en el proceso.

(III) Método OVD (Outside Vapor Deposition)

Este método fue desarrollado por Corning Glass Works y para la fabricación de la preforma se parte de una varilla de substrato cerámica.

Los cloruros vaporosos se introducen en la llama del quemador y la llama caldea radicalmente la varilla de substrato cerámica a la vez que se desplaza longitudinalmente en su misma dirección.
De esta forma se aplican centenares de capas, comenzando inicialmente con el núcleo para finalizar con el revestimiento.
La preforma porosa con forme la tasa de crecimiento de la misma va siendo desprendida de la varilla de substrato cerámica que la servia de soporte. A continuación se realiza el proceso de síntesis de la preforma, desglosable en los procesos de secado de la misma con cloro gaseoso y posterior colapsado de la preforma de forma totalmente análoga a los realizados con la técnica VAD. Se logra de esta forma sintetizar el núcleo y el revestimiento de la fibra óptica. En la figura 1.6-3 se esquematiza el método y se indica los materiales de aportación y aditivos de dopado que intervienen en el proceso. La tasa de deposición en ambas técnicas resulta muy ventajosa pues aumenta con el crecimiento progresivo debido al incremento de la superficie del substrato.
Las tasas de deposición que se alcanzan son del orden del 4,3 g/min. lo que representa una tasa de fabricación de fibra óptica de 5 Km/hr una vez eliminadas las pérdidas iniciales en el estirado de la pre forma.
Otra ventaja de ambas técnicas consiste en que optimizándose el proceso de secado es posible fabricar fibras de muy baja atenuación y de una gran calidad, porque los perfiles así obtenidos son lisos.

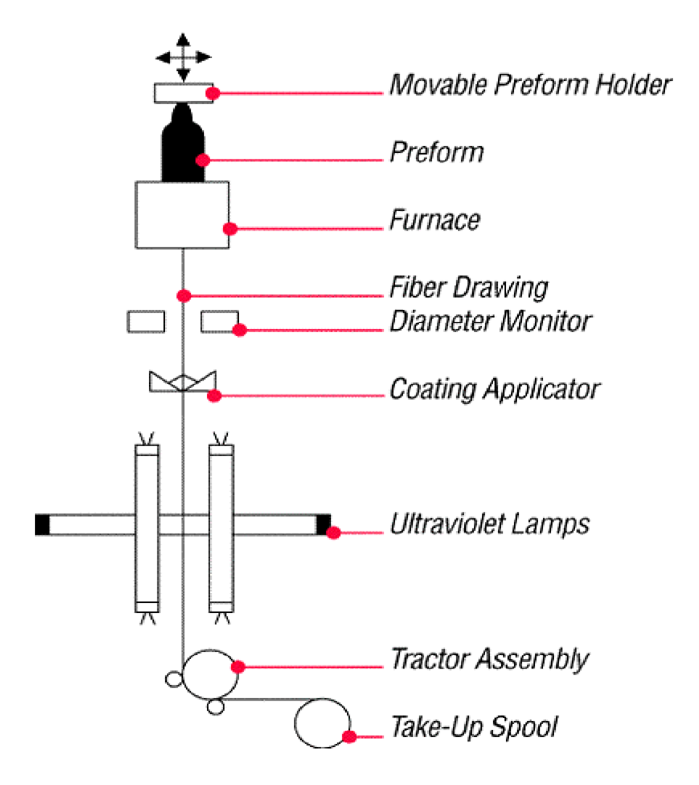


(IV) Método PCVD Plasma Chemical Vapor Deposition

Este método desarrollado por Phillips, inicia la oxidación de los cloruros de silicio y germanio obligándoles a pasar por un estado de plasma seguido de un proceso de deposición interior. El proceso se caracteriza por la obtención de perfiles especialmente lizos sin estructura anular reconocible.

Proceso de Estirado de la fibra óptica:

El estirado de la fibra óptica es un proceso común para todas las técnicas de fabricación de fibras óptica y consiste en someter a la preforma en el interior de un horno tubular abierto a una temperatura de 2000 ℃ que garantiza el rebland ecimiento del cuarzo.
En este proceso se fija el diámetro exterior de la fibra óptica. Para mantener éste constante y evitar las variaciones del diámetro de la fibra óptica los factores decisivos son la constancia y uniformidad en la tensión de tracción que origina el estiramiento de la fibra, junto con la ausencia de corrientes de convección en el interior del horno. Otro factor decisivo es la atmósfera del horno en la que se ha de evitar el que impurezas o partículas provenientes del exterior o del propio horno como grafito u óxido de circonio puedan contaminar la superficie reblandecida de la fibra óptica.
En efecto, cualquier cuerpo extraño depositado sobre la superficie caliente de la fibra óptica puede ocasionar micro fisuras en su superficie y, por añadidura, la rotura de la fibra óptica.
Durante el proceso de estirado también se aplica a la fibra óptica una capa primaria de material sintético de protección que preserva la superficie de las fibras mecánicamente y evita la formación de micro curvaturas.
El material utilizado para esta primera protección es un polímero que se aplica inicialmente mediante un prepolimerizado viscoso, el cual posibilita las elevadas velocidades de estirado de la fibra óptica comprendidas entre 1 m/seg. y 3 m/seg. y que crea una capa uniforme, sobre la fibra óptica, totalmente libre de burbujas e impurezas.



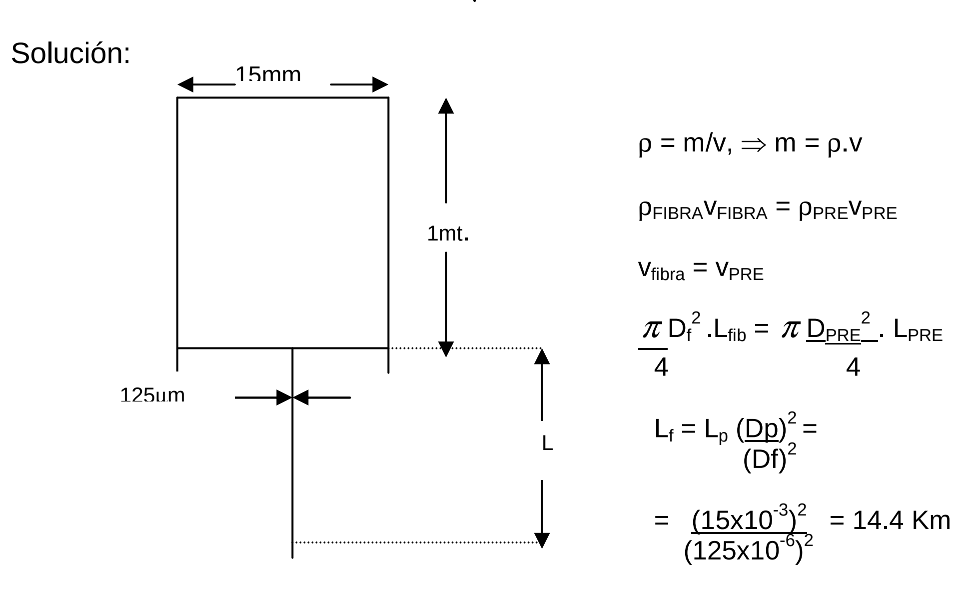
El paso siguiente consiste en el endurecimiento de la citada protección para la obtención de la capa definitiva de polímero elástico, que se realiza habitualmente por procesos térmicos.
Actualmente se aplican procesos de reacciones químicas mediante el empleo de radiaciones ultravioletas.

La fibra óptica así obtenida es enrollada en tambores y queda dispuesta para sus utilizaciones posteriores, habitualmente la confección de cables ópticos. En la figura se esquematiza el proceso de estirado de la fibra óptica y se indican cada uno de los pasos que conforman el proceso.

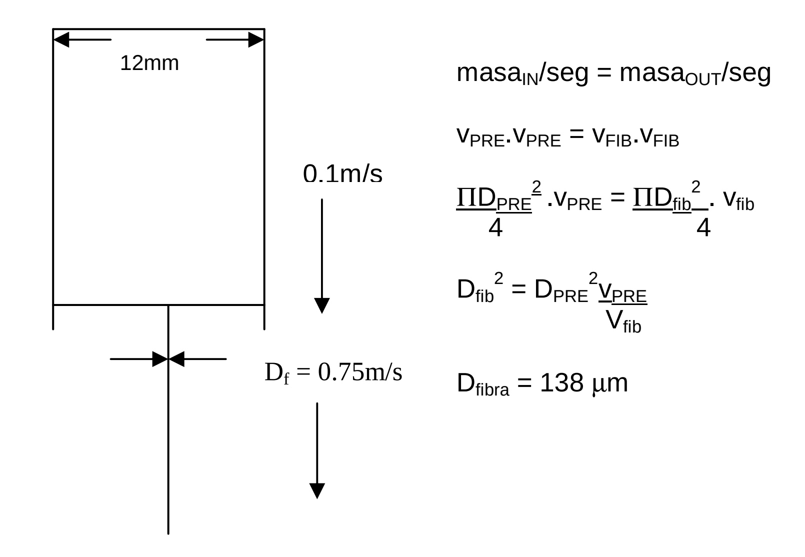
Problemas:

a) Utilizando el principio de conservación de masa, calcular la longitud aproximada de la fibra que será obtenida de una preforma de 15mm de diámetro, 1 m de largo, si el diámetro exterior de la fibra es 125 µm.

Solución:



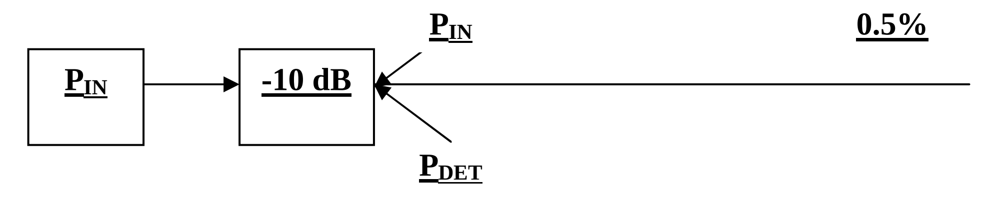
b) Asumir una fibra ideal en el proceso. Calcular el diámetro de la fibra de una fibra fabricada de una preforma con un O.D. de 12mm, corriéndose con la velocidad de 0.1m/s, en que velocidad de la fibra es de 0.75 m/s?



Problema:

Ocurre una ruptura de fibra con una pérdida de 3 dB / km. La potencia de salida de un OTDR será utilizada para localizar la ruptura en 250 mW y la potencia reflejada detectada es 1µW. Aproximadamente –10 dB de pérdida son encontrados en el acoplamiento del OTDR y la fibra, aproximadamente –6 dB en la señal retornada es una pérdida en el splitter utilizado en el OTDR para detectar el pulso de retorno. La reflectividad de una ruptura perpendicular en la fibra es aproximadamente 4%. La reflectividad promedio de una ruptura no perpendicular es cerca de 0.5%. Utilizando el valor de reflectividad, calcular la distancia de ruptura en la fibra.

Solución:



α = 3dB / km. P_{IN} = 250 mW $P_{DETECTOR}$ = 1μW

Si tenemos:

10 Log (1x10^{-6} / 250 x 10^{-3}) = -53.87 dB ≈ 54 dB de pérdida total.

Entonces: -54 dB – (-16) = -38 dB de pérdida en la fibra.

38 dB = 3 (dB / Km) x X Km. 2 + Pot. Transmitida

38 dB = 6 (dB / km) x Km. + 20 Log (1 / 0.005).

38 dB = 6 dB X + 23 dB

X = 1.5 Km.

CAPITULO

4

CABLES DE FIBRA OPTICA

Revestimiento de los conductores
Tipos de cables de fibra óptica
Cables de fibra óptica de tipo ajustado
Cables de fibra óptica tipo PAL
Cables de fibra óptica tipo CINTA
Cables de fibra óptica tipo PAL CORRUGADO

CAPITULO IV

CABLES DE FIBRA OPTICA

Los conductores de fibra óptico son muy delgados y tienen la gran desventaja de poderse fracturar fácilmente a menos que se le añadan capas adicionales de protección que además permiten identificar a cada uno de los conductores en el interior de un cable, y permitirle mayor flexibilidad. A este tipo de estructura se le conoce como conductor revestido óptico.

REVESTIMIENTOS DE LOS CONDUCTORES DE FIBRA OPTICA

Las fibras ópticas después del revestimiento (cladding) poseen unos revestimientos que les sirve como protección, denominados primario, amortiguador y secundario.

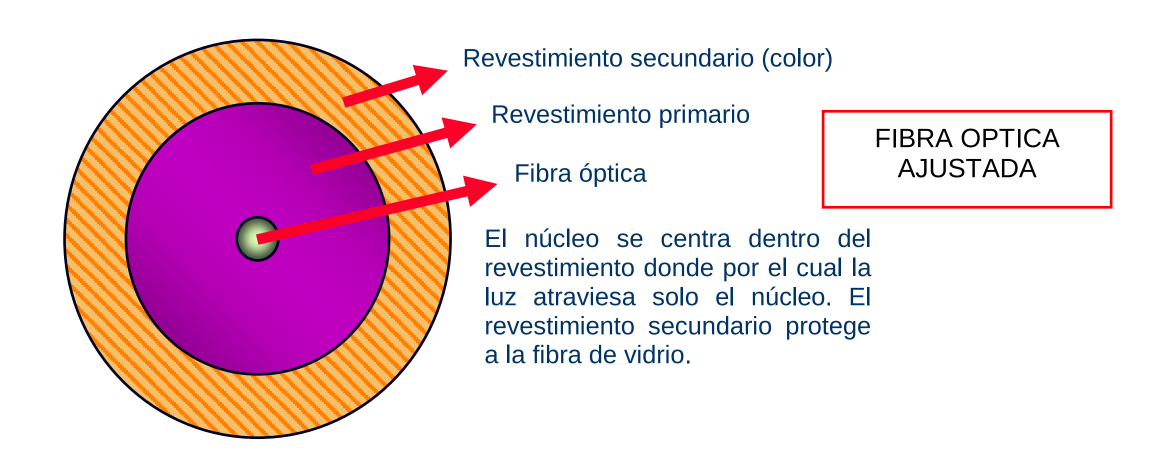
Estos revestimientos están fabricados, por lo general, con polímetros que no afectan la propagación de la luz en el interior de las fibras, ya que carecen de propiedades ópticas.

Los revestimientos que se pueden aplicar sobre el conductor óptico pueden ser de dos tipos :

Revestimiento “Tight” o Ajustado

Es aquel en el cual el recubrimiento primario y secundario viene adherido sobre el revestimiento de la fibra óptica. Están fabricados en un material elastomérico, que le da fortaleza a la fibra, le proporciona resistencia al impacto y la aísla de la humedad.

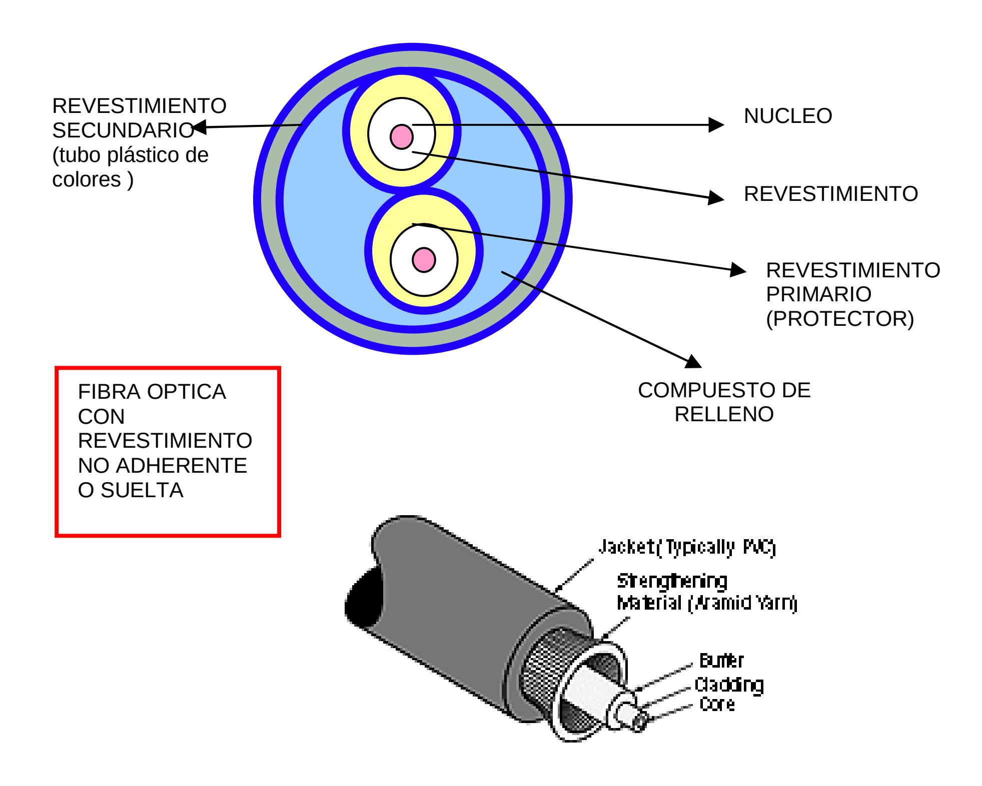
El diámetro de este tipo de fibra recubierta puede ser de 250 y 900 µm en total. Las fibras de 250 µm de diámetro se encuentran en el interior de los cables de las redes de planta externa en cambio los conductores que poseen un diámetro de 900 µm son usados en redes de cables privados y en cables de conexión en los distribuidores ópticos denominados ODF o FDU (Fiber Distribution Unit)



Revestimiento “Loose” o suelto

En este tipo de fibra, el revestimiento primario no se encuentra ligado al revestimiento secundario.
Existe un total desvinculamiento mecánico entre la fibra óptica y el revestimiento secundario, el cual es un tubo plástico. La fibra óptica viene depositada en el interior de este tubo.

El revestimiento secundario posee internamente un compuesto de relleno, tipo gel, que permite que dentro de él puedan existir varias fibras ópticas mecánicamente “aisladas”.



TIPOS DE CABLES DE FIBRA OPTICA

CABLES DE FIBRA OPTICA TIPO AJUSTADO

Este tipo de cables esta formado por un conjunto de fibras ópticas tipo “tight”, unidas con hilos de amarre codificados por colores y aplicados helicoidalmente.

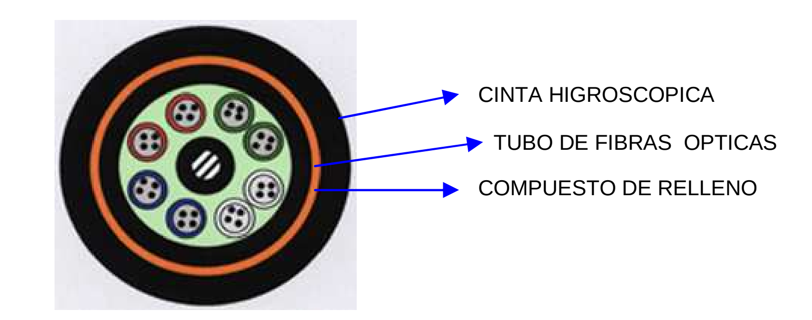
Cada fibra tiene un diámetro externo de 250 µm.
El número máximo de conjuntos pueden ser de hasta 16
El número máximo de fibras por conjunto puede ser hasta 12.

La identificación de cada una de las fibras del cable, es dada por la codificación de colores de los amarres y de las mismas fibras.

Los conjuntos de fibras ópticas amarradas vienen introducidos en un tubo plástico extruido que forma el núcleo del cable; el interior de este tubo viene totalmente impregnado con un compuesto de relleno.

El tubo de plástico puede tener un diámetro de 7.9 mm cuando aloja más de 4 y menos de 8 tubos (para una capacidad de 48 a 96 fibras).

El código de colores empleado tanto para identificar los amarres de los tubos como el de las fibras, no obedece al código universal puesto que dicha identificación la establece cada uno de los fabricantes. Sobre el tubo de plástico que forma el núcleo del cable, vienen otros elementos que dan resistencia mecánica al mismo; éstos dependen de las exigencias que el medio requiera, según sea en donde y como se vaya a instalar dicho cable.



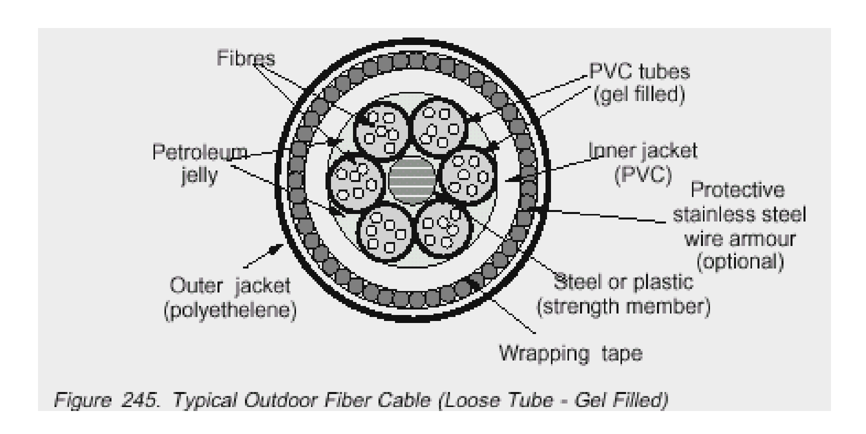


Figure 245. Typical Outdoor Fiber Cable (Loose Tube - Gel Filled)

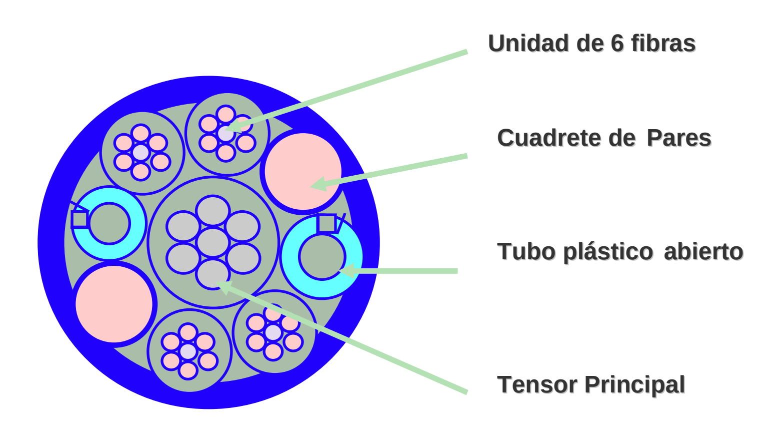
CABLES DE FIBRA OPTICA TIPO PAL

El aislamiento de este tipo de cable esta compuesto por una cinta de aluminio adherida a una capa de polietileno negro. (PAL).

Es un cable formado por conductores de fibra óptica que poseen un revestimiento ajustado o de tipo suelto. Las fibras ajustadas o los tubos que contienen las fibras ópticas de tipo suelto, vienen trenzados alrededor de un elemento central, metálico o de fibra plástica conocidos como KEVLAR, que normalmente se recubre con polietileno. Este último se usa para proporcionar la resistencia mecánica al cable.

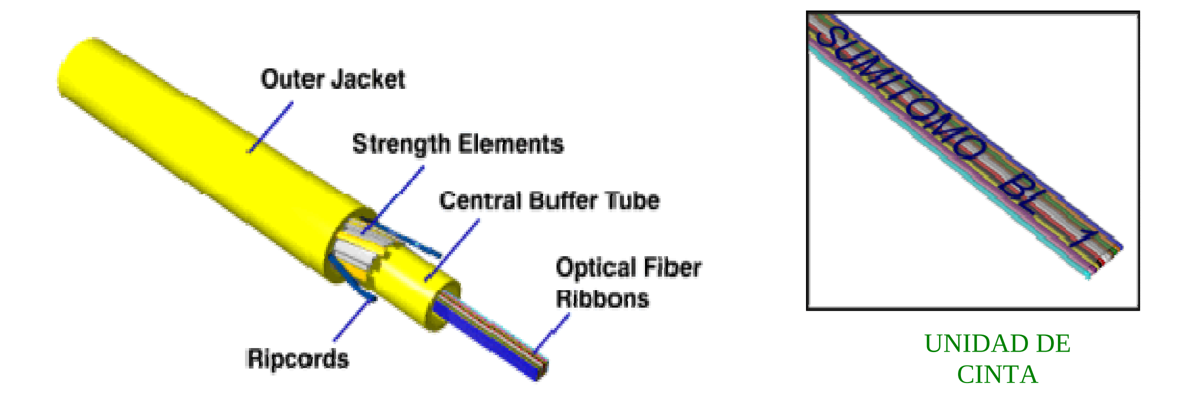
Junto con las fibras ajustadas o los tubos que contienen las fibras de estructura suelta, vienen unos elementos plásticos rígidos, que se usan como relleno, para lograr la circularidad del cable.

El código de colores usado para la identificación de las fibras ópticas, en este tipo de cable, se detallara mas adelante.



CABLES DE FIBRA OPTICA TIPO RIBBON (CINTA)

Este tipo de cable esta formado por cintas o listones de 12 fibras tipo ajustado, unida entre si por un material inmune a los rayos ultravioletas.



UNIDAD DE CINTA

Dentro de un cable se pueden tener hasta 18 listones, con marcas de identificación de colores a intervalos de 15 cm., agrupados de tal manera que el núcleo del cable forma un rectángulo.

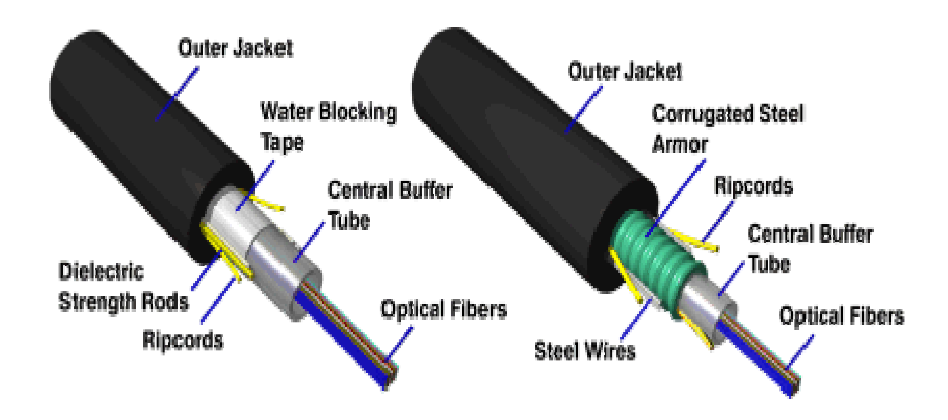
Todo el paquete de listones se aloja en un tubo plástico extruido, el cual viene totalmente impregnado con un compuesto de relleno.

El tubo de plástico puede tener un diámetro de 7.9 mm cuando aloja mas de 4 y menos de 8 listones (48 a 96 fibras).

El código lo establece el fabricante y no se encuentra normado.

CABLES DE FIBRA OPTICA TIPO PAL CORRUGADO

Este tipo de cable es similar al anterior, en cuanto a la conformación y disposición de las fibras ópticas. La diferencia radica en que sobre la capa PAL, trae otra de acero galvanizado corrugado, para protección contra los roedores y agentes externos que lo puedan deteriorar y otra de polietileno negro, que lo protege contra los rayos ultravioleta.



Estos cables son usados principalmente en tendidos canalizados y directamente enterrados donde las condiciones de ruta requieren de un cable con mejor desarrollo en tendidos con muchas curvas.

Existen un gran número de variedades de estructuras de cables de fibra óptica, las cuales no se encuentran normadas debido a que cada una de ellas es establecida por los fabricantes de

acuerdo a las necesidades del clientes; pero si podemos indicar que estas estructuras dependen de los siguientes factores como son:

- Tipo y Método de Instalación
- Tipo de Red de servicio
- Metodología de Protección
- Tipo de servicio
- Por la Alimentación a dispositivos activos ópticos intermedios en un enlace.
- Por el número de fibras
- Por la resistencia al fuego.
- Por Aplicaciones en redes diferentes a las de telecomunicaciones.

En nuestro país la empresa que más ha difundido las redes ópticas es la empresa española Telefónica, la cual en sus planes de expansión ha empleado una serie de cables de procedencia distinta y en las cuales se ha considerado el código de colores de los fabricantes. A continuación se presenta un ejemplo de algunos de ellos, que poseen una estructura de tipo cilíndrico pero de tubos.

	FABRICANTE CANTIDAD	ATT	FURUKAWA	SIECOR	NORTHERN TELECOM	PIRELLI	CONDUME	ALCATEL
T	1	AZUL	VERDE	MARRON	MARRON	BLANCO	ROJO	BLANCO
U	2	NARANJA	AMARILLO	NARANJA	NARANJA	BLANCO	AZUL	ROJO
B	3		BLANCO	VERDE	VERDE	ROJO	BLANCO	AZUL
O	4		BLANCO	AZUL	AZUL	VERDE	BLANCO	VERDE
S	5		BLANCO				BLANCO	
	6		BLANCO				BLANCO	
F	1	MARON	ROJO	MARRON	MARRON	VERDE	AZUL	VERDE
I	2	NARANJA	AMARILLO	NARANJA	NARANJA	ROJO	BLANCO	ROJO
B	3	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	AZUL		AZUL
R	4	AZUL	AZUL	GRIS	AZUL	AMARILLO		AMARILLO
A	5	GRIS	VIOLETA	BLANCO	GRIS	VIOLETA		GRIS
S	6	BLANCO	BLANCO		BLANCO	MARRON		VIOLETA
	7	ROJO						MARRON
	8	NEGRO						NARANJA
	9	AMARILLO						
	10	VIOLETA						
	11	NARANJA - BLANCO						
	12	AZUL - BLANCO						

CAPITULO

5

EMPALMES (SPLICE)

Empalme de fibra óptica
Métodos de empalme: de fusión, mecánico y unión adhesiva.

CAPITULO V

EMPALME DE FIBRA OPTICA:

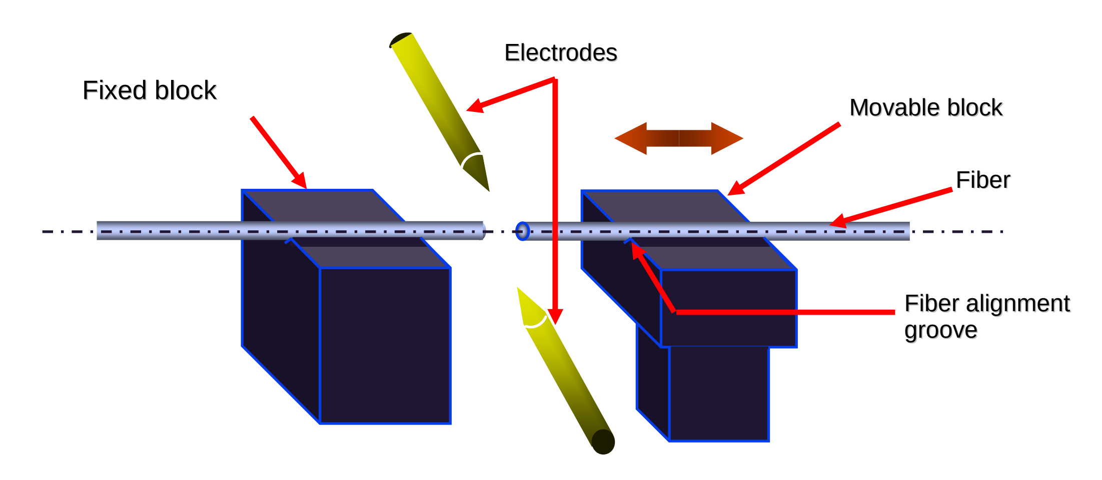
- La implementación práctica de sistemas de comunicaciones por fibra óptica requiere de la unión de diferentes tramos de cables para realizar enlaces largos. Esas uniones son de gran importancia para obtener una alta calidad de transmisión y reducido mantenimiento.
- Los empalmes de fibra óptica deben tener una atenuación baja y estable durante todo el tiempo de vida útil del sistema y sobre un amplio rango de condiciones ambientales.

Métodos De Empalme:
Los empalmes de fibra; óptica se pueden realizar empleando uno de los tres métodos siguientes:

- Método De Fusión
- Método Mecánico
- Método De Unión Adhesiva

METODO DE FUSION:

En este método las dos fibras son empalmadas aplicando calentamiento localizando entre los extremos de fibras prealineados, causando que las fibras se ablanden y se funda simultáneamente para formar un hilo de vidrio continuo. El calor de fusión es generado por el arco eléctrico de dos electrodos conectados a una fuente de alto voltaje.
Este método ofrece la atenuación óptica más baja (menor de 0.1 dB) y la más alta confiabilidad. Es utilizado en enlaces de cables continuos y largos (decenas de Km.)



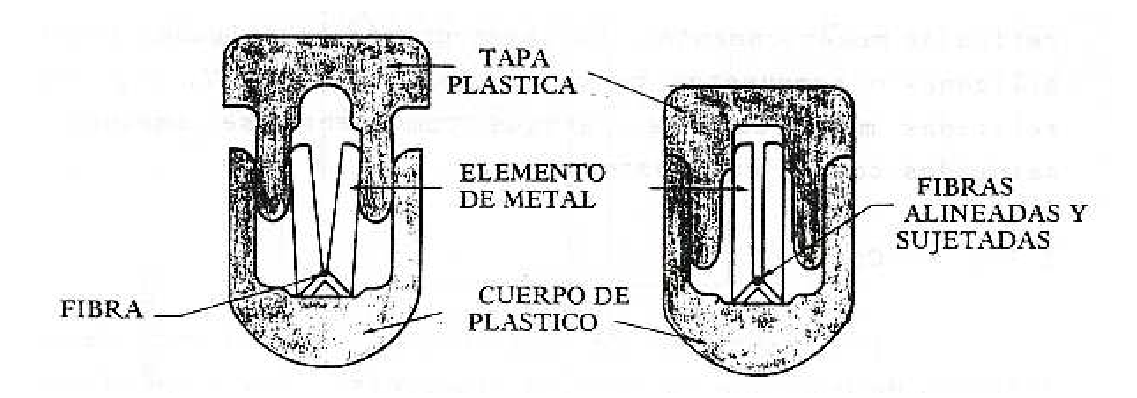
METODO MECANICO:

Un empalme mecánico consiste de cuatro componentes básicos:

- Una superficie de alineamiento (surco – v o guías formadas por cilindros, varillas o por la esquina de un tubo de sección cuadrada).
- Un retenedor (muelle, cubierta, etc.) para mantener las fibras sobre la superficie de alineamiento.
- Un material de adaptación de índice de refracción (gel de silicona, adhesivos de curado UV, resina epóxica y grasas ópticas.
- Un encaje o manguito de protección.

Con este método se consigue empalmes con perdidas típicas que varia entre 0.1 y 0.2 dB, a la temperatura ambiente (20° C). Sin embargo, los empalmes, mecánicos son sensitivos a los cambios de temperatura ambiental.

Este método es excelente para sistemas de corto alcance (menor que 2Km).



METODO DE UNION ADHESIVA:

Por este método, un adhesivo es usado para empalmar las fibras. El alineamiento es proporcionado por un substrato, un tubo de vidrio transparente o un manguito.
En algunos métodos, los extremos cortados de las fibras son topados en adhesivos vulcanizados. El adhesivo es seleccionado para proporcionar una adaptación de índice de refracción y rigidez mecánica del empalme.
La atenuación típica conseguida con este método es de 0.1 dB o menor. Sin embargo, son más sensitivos a los cambios de temperatura ambiental.



DISPOSITIVOS OPTICOS

Fuentes o emisores ópticos
Diodo LED
LED de emisión superficial
LED de borde
Valores caracterices de los LED
Diodo LASER, características
Valores caracterices de los LASER
Parámetros de LED y LD
Potencia óptica de emisión
Detectores o receptores ópticos
Fotodiodo PIN
Fotodiodo APD
Parámetros característicos de los fotodetectores
Características comparativas entre PIN y APD

CAPITULO VI

DISPOSITIVOS OPTICOS

Para transmitir señales luminosas a través de fibras ópticas se requiere en su inicio de un elemento emisor que convierta las señales eléctricas en ópticas (E/O) y otro en su extremo final que convierta las señales ópticas en eléctricas nuevamente (O/E).

Los conversores electro-ópticos se fabrican con base en la combinación de los elementos químicos del tercer, cuarto y quinto grupo de la tabla periódica de los elementos.

El Indio (In), el Galio (Ga), el Germanio (Ge), el Silicio (Si), el Arsénico (As) y el Fósforo (P), han demostrado ser los mas aptos para la fabricación de éstos dispositivos.

La tecnología de los semiconductores posibilito construir emisores y detectores de luz de pequeñas dimensiones y de bajo costo. Los emisores y detectores de luz, deben de cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Los fotoemisores deben de emitir luz a la misma longitud de onda (λ) que corresponde a la ventana de transmisión de la fibra óptica.
2. La emisión de luz debe de ser en el menor número de modos posible; preferiblemente uno sólo.
3. Los emisores y receptores deben tener unos tiempos de vida útil muy largos, superiores a las 10^5 horas.
4. Los emisores y receptores deben tener la posibilidad de transmisión analógica y digital.
5. Los detectores deben ser de una sensibilidad muy elevada.

FUENTES O EMISORES OPTICOS

Existen dos opciones de fuentes semiconductoras para ser usadas en los sistemas implementados con fibras ópticas como emisores de luz.

Diodo LED (Diodo Emisor de Luz)
Diodo LASER (Diodo de Amplificación de Luz por emisión estimulada de radiación).

Valores típicos de la potencia de acoplamiento



	Dispositivo	1 a Vent.	2 a Vent.	3 a Vent.	4 a Vent.
		850nm	1310nm		1550nm
		FO $_{MM}$	FO $_{MM}$	FO $_{SM}$	FO $_{SM}$
TIPOS DE LED	(S)LED	-15dBm	-18dBm	-35dBm	-33dBm
TIPOS DE LED	(E)LED	-9dBm	-12dBm	-25dBm	-23dBm
TIPOS DE LED	LED	0dBm	0dBm	-7dBm	0dBm
	LASER	8dBm	2dBm	3dBm	2dBm

S $\rightarrow$ Superficie E $\rightarrow$ edge – bode
SLED: Led emisor por superficie ELED: Led emisor por bandas

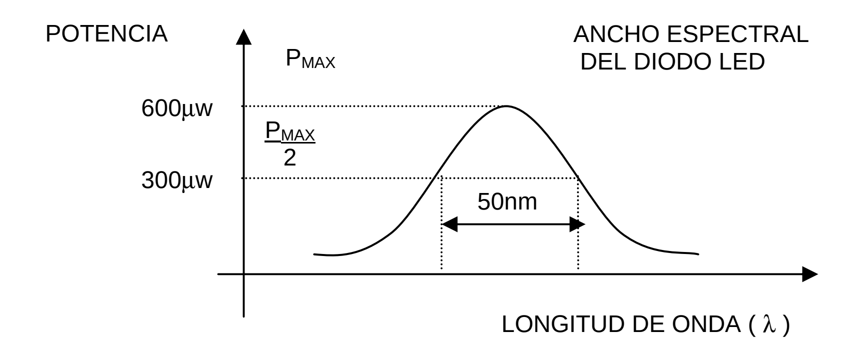
DIODO LED

Es un diodo de material semiconductor, que forma una unión P-N de las mismas características que un diodo convencional de germanio o silicio.

La diferencia principal con los diodos convencionales radica en que ciertos materiales que se usan como dopantes en el LED, son elegidos de tal manera que el proceso de recombinación electrónica sea radiactivo y se genere luz.

De acuerdo al material usado para construir el LED, se determinará si la luz emitida por éste es visible o invisible, y de que color es.

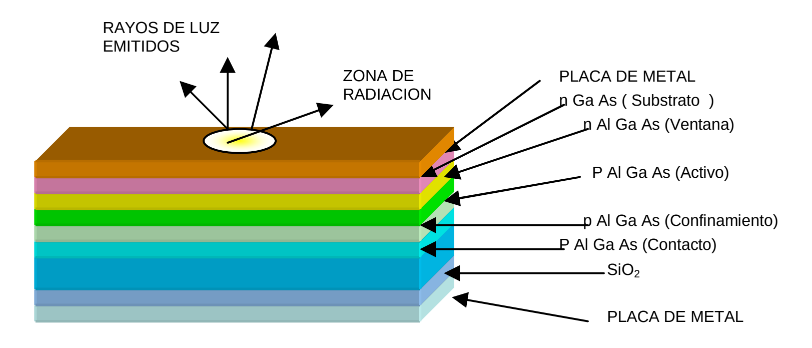
Debido a la gran dispersión de luz y a la distribución espectral tan amplia que presenta un diodo LED, éste es usado sólo cuando se requiere implementar transmisores a distancias cortas y con poca salida de potencia. Son relativamente baratos y poseen un tiempo de vida útil muy largo (10^7 horas).



Para aplicaciones practicas en telecomunicaciones y por razones de velocidad y capacidad de transmisión, se desarrollaron los siguientes tipos de LED:

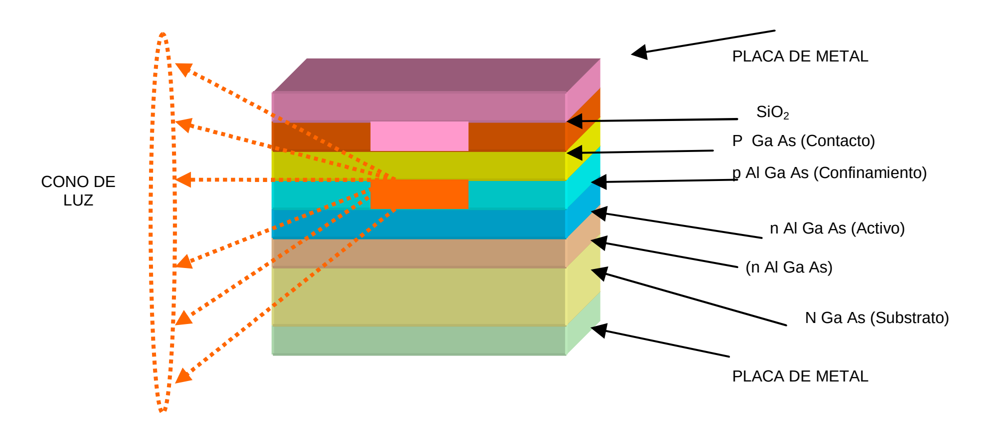
LED DE EMISION SUPERFICIAL.

Este tipo de Diodo emite la luz en múltiples direcciones, pero según la forma física de la unión, puede concentrase en un área muy pequeña denominada “zona de emisión”. Con la ayuda de lentes ópticos convergentes esféricos o de varilla que se colocan en su superficie, se pueden lograr mayores concentraciones de luz.

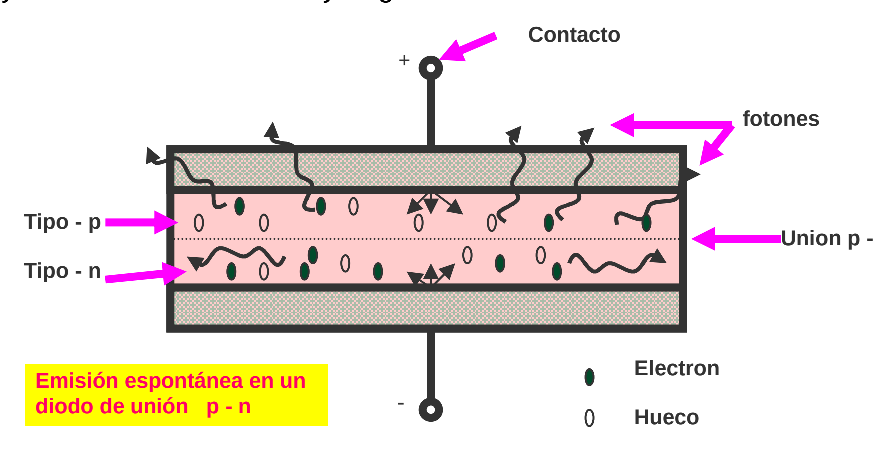


DIODO LED DE BORDE

Este diodo emite un patrón de luz en forma elíptica, más direccional que el emitido por los diodos de emisión superficial.



Los diodos emisores de borde son más utilizados que los diodos emisores de superficie, porque emiten mayor cantidad de luz; sin embargo, sus pérdidas de luz por conexión son mayores y su ancho de banda muy angosto.



VALORES CARACTERISTICOS DE LOS DIODOS LED

MATERIAL	GaAs	AlGaAs	InGaAsP
TIPO DE LED	IRED	IRED (pot)	IRED (pot)
LONGITUD DE ONDA (λ)	880 a 950 nm	800 a 885 nm	1300 a 1550 nm
TIEMPO DE CONMUTACION	20 a 100 nseg	5 a 20 nseg	5 a 20 nseg
POTENCIA ACOPLABLE	2 µW	30 a 100 µW	50 a 100 µW
VELOCIDAD DE TRANSMISION	5 a 10 Mbps	30 a 100 Mbps	50 a 200 Mbps
ANCHO ESPECTRAL	50 nm	45 nm	100 nm

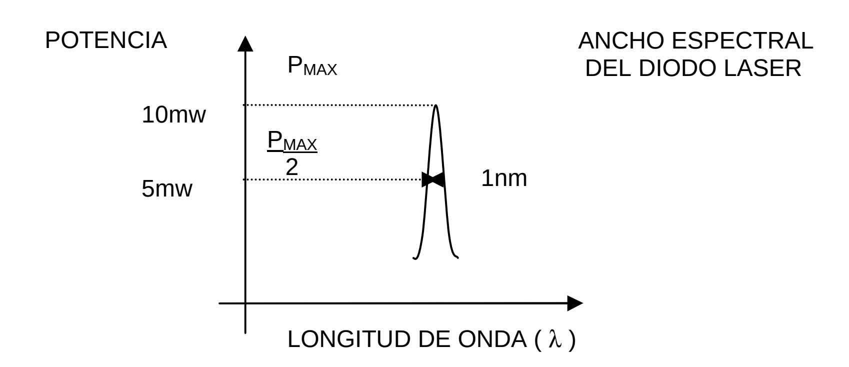
IRED: Diodo emisor de infrarrojos

IRED (pot):Diodo emisor de infrarrojos de potencia

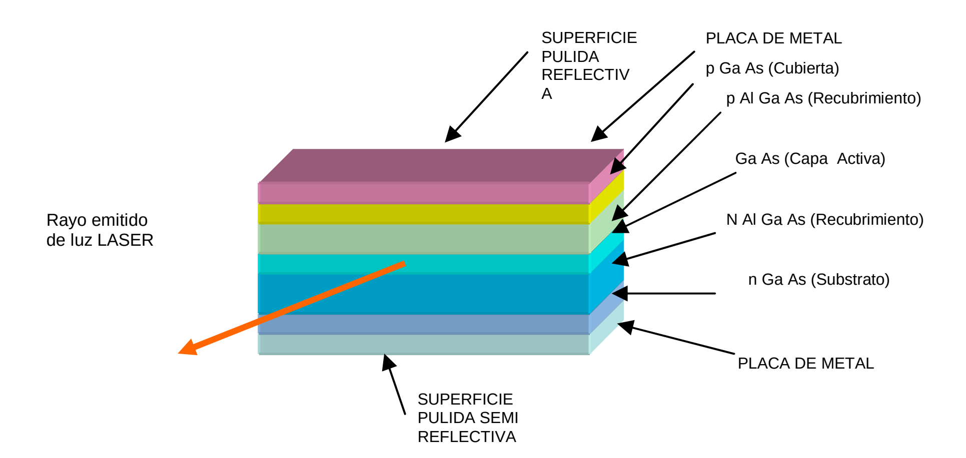
Diodo LASER

El LASER es básicamente un diodo semiconductor que cuando se polariza directamente emite una luz coherente monocromática y muy estrecha en su ancho espectral de 1 a 5 nm.

Esta luz debido a su espectro tan estrecho, no se dispersa tanto como la luz producida por un diodo LED, por lo que se puede emplear eficientemente para transmisiones a mucha distancia y a frecuencias muy superiores a los 300 Mhzs.



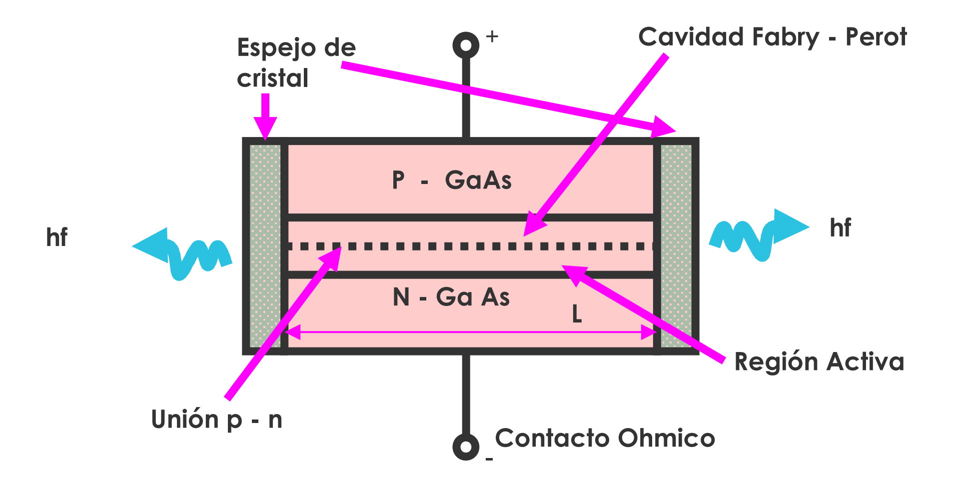
El diodo LASER consta básicamente de una estructura (p – n) y contactos metálicos. Inicialmente se fabrico de Ga As, luego pasó a ser fabricado de Al Ga As, logrando así emisiones en la franja de 800 a 900 nm, que es donde está la primera ventana de transmisión de las fibras ópticas.



El diodo LASER produce una salida de 5 mW, con una corriente de 200 mA y una tensión de 1.5 volt.

Existen dos tipos de diodo LASER:

1. Diodos LASER de Franja de óxido (DL) Ga AlAs / Ga As.
2. Diodos LASER con control por índice (ILD) GaInAs / InP.



VALORES CARACTERISTICOS DE LOS DIODOS LASER

MATERIAL	GaAlAs / GaAs	GaInAs / InP
TIPO DE LASER	DL	ILD
LONGITUD DE ONDA (λ)	880 A 885 nm	1300 A 1600 nm
TIEMPO DE CONMUTACION	< 1 nseg	> 1 nseg
POTENCIA ACOPLABLE	Para ϕ = 50 µm = 1 a 5 mW	Para ϕ = 50 µm = 1 a 3 mW Para ϕ = 10 µm = 0.5 a 1.5 mW
VELOCIDAD DE TRANSMISION	≤ a 565 Mbps (*)	≤ a 1200 Mbps (**)
ANCHO ESPECTRAL	3 a 5 nm	3 a 5 nm

(*) Entre 5 a 20 Kms. (**) Hasta 35 Kms

PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LOS DISPOSITIVOS LED Y LD

La calidad de funcionamiento de un dispositivo suele definirse mediante la acotación de una serie de parámetros característicos. En el caso de los emisores ópticos de tipo LED y LD, para su uso en las comunicaciones ópticas, los parámetros a determinar deberán ser orientados a :

- Definir el comportamiento en cuanto a la traducción electro-óptica.
- Adecuar las características radio métricas de los dispositivos de acuerdo con el portador físico (fibra óptica).
- Diseñar circuitos de excitación idóneos con respecto a la naturaleza del tipo emisor.

En tal sentido los parámetros característicos que permiten la elección del emisor apropiado a utilizar en un sistema de transmisión por fibra óptica son:

1. - LONGITUD DE ONDA DE EMISION λ_E

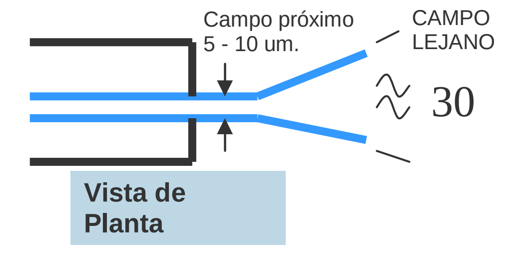
Representa la longitud de onda de trabajo correspondiente a la máxima potencia emitida.

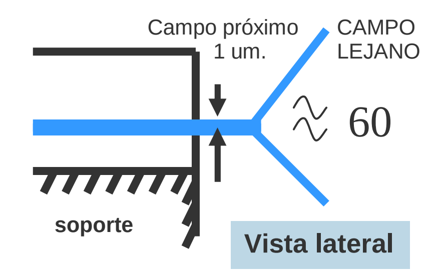
2.- ANCHO ESPECTRAL $\Delta\lambda$

Es el ancho de banda espectral al 50% de la máxima potencia emitida. Típicamente es de 20 a 40 nm para los LED y de 2 a 4 nm para los LD. Para los dispositivos SCH el ancho espectral se reduce hasta 0.1 nm.

3.- LOBULO DE EMISION

Es la magnitud relativa de la potencia radiada en función de la dirección a partir del eje óptico previsto en el encapsulado del emisor. Es conocido a través de los ángulos de radiación sobre las direcciones paralela y perpendicular a la unión.

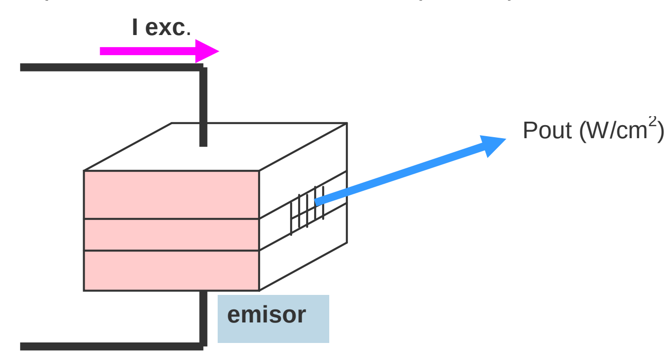




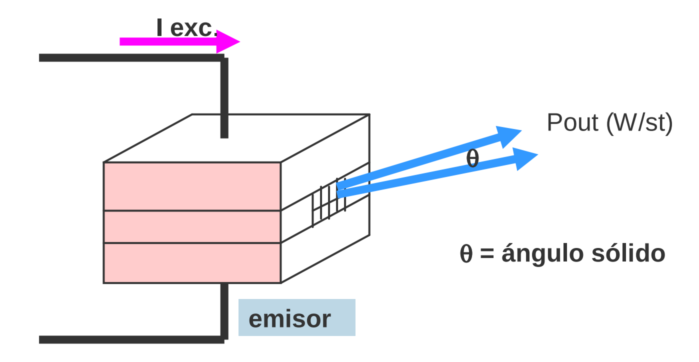
4.- POTENCIA OPTICA DE EMISION
Es la potencia de radiación óptica emitida para un determinado valor de la corriente inyectada.



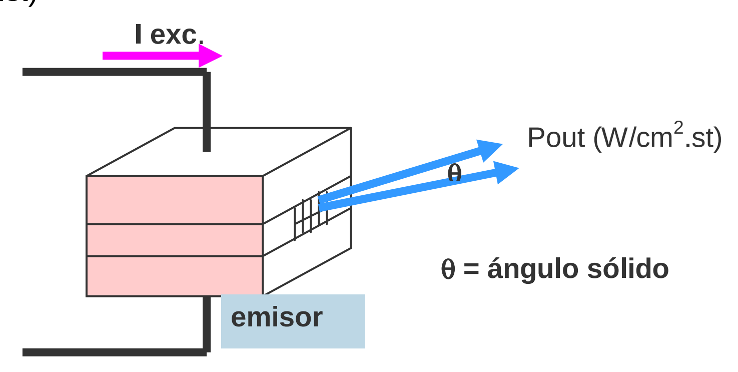
5.- EMITANCIA RADIANTE
Es la potencia óptica emitida por unidad de área radiante (W/cm^2)



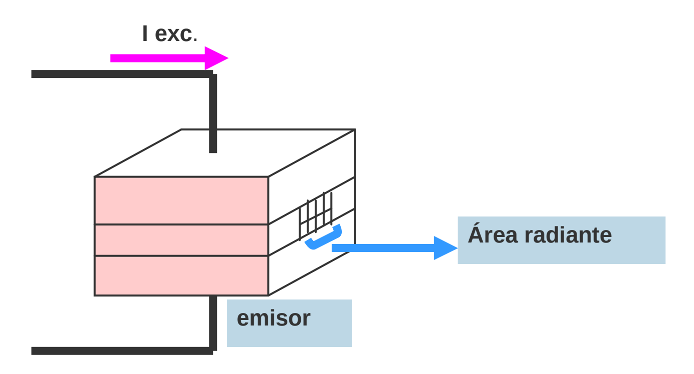
6.- INTENSIDAD RADIANTE
Es la potencia óptica emitida por unidad de Angulo sólido (W/st)



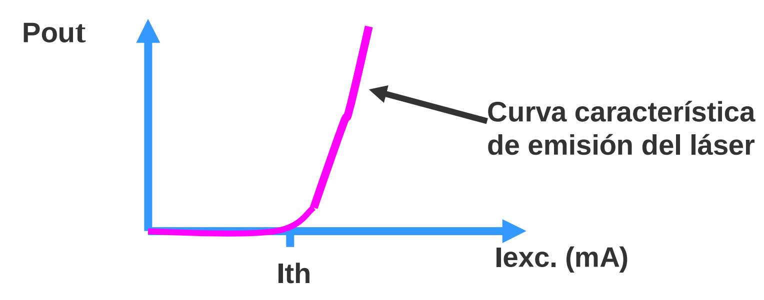
7.- RADIANCIA
Es la potencia óptica por unidad de área radiante y unidad de ángulo sólido del lóbulo de emisión (W/cm^2.st)



8.- AREA RADIANTE
Superficie de emisión de la unión semiconductora. Es conocida a través de las dimensiones de la parte activa del emisor.



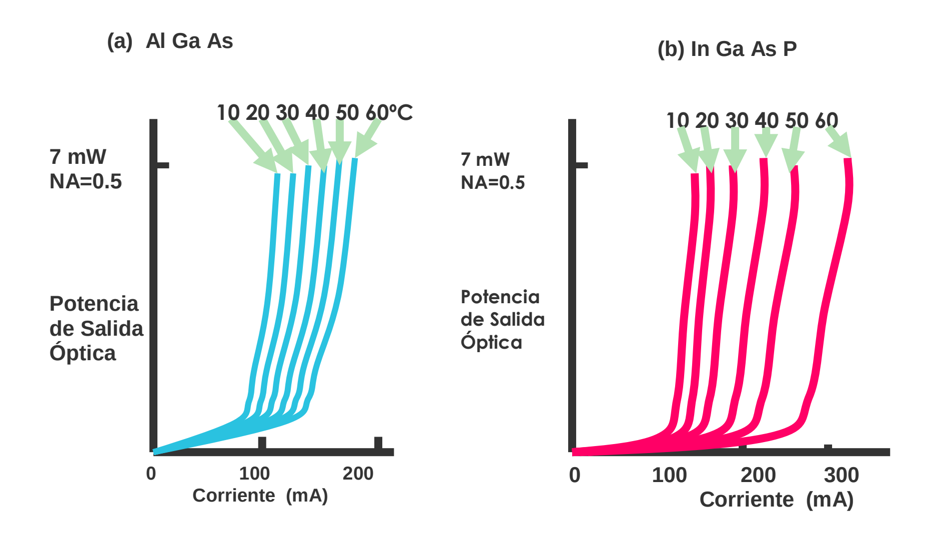
9.- CORRIENTE UMBRAL I_{TH}
Es la intensidad de corriente de inyección, en un diodo LD. Representa también el valor de corriente tal que para valores superiores a la misma se produce el fenómeno de emisión estimulada.



10.- TIEMPO DE SUBIDA ts
Es el tiempo necesario para que la señal de respuesta a un impulso eléctrico evolucione desde el 10% al 90% de su valor final.

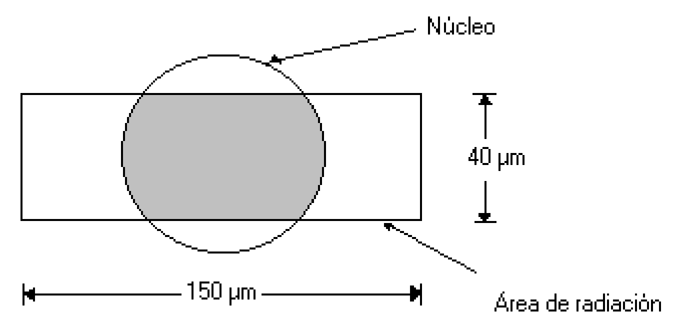
11.- TIEMPO DE BAJADA tb
Es el tiempo representativo de la evolución desde el 90% al 10% de la amplitud del impulso luminoso durante el proceso de desaparición del mismo.

12.- TIEMPO DE RETARDO tr
Es la diferencia entre los instantes en que la señal óptica de salida y la señal eléctrica de entrada del emisor alcanzan la cota correspondiente al 50% de la máxima amplitud.
Las curvas a continuación muestran la dependencia de las características del LASER respecto de la Temperatura.



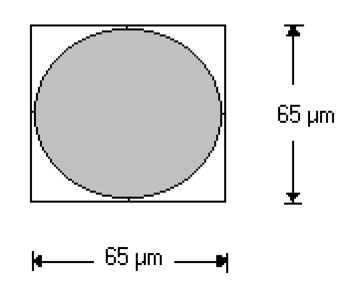
Ejercicio:

1. Un led superluminicente (m=3) el cual tiene una potencia de radiación de 7mW, es acoplada a una FO_{MM} 62,5/125 μm con AN de 0,21. hallar las perdidas de acoplamiento en dBm si :

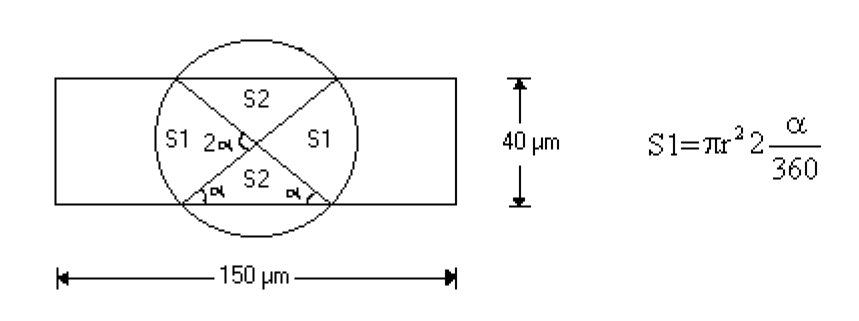


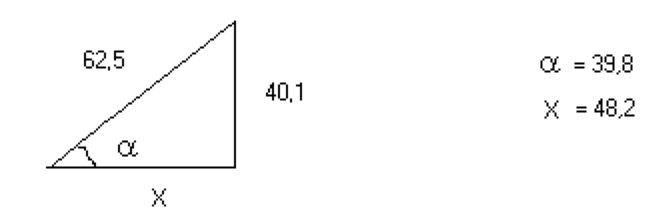
2. Un diodo láser (m =7) tiene una potencia de radiación de 7,63dBm. Se acopla a una FO_{MM} 65/125 μm con η_1 =1,5 sabiendo que la luz se propaga dentro de la F.O con un Angulo de 5,13, calcular :

a) θA
b) $\Delta = 49\%$
c) $\eta 2$
d) Pc [dBm]
e) Perdidas de potencia en dB.



Solución 1:



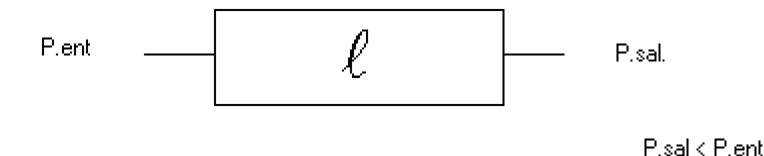


$$S_1 = \pi(31{,}25)^2 \frac{79{,}6}{360} = 678{,}66\mu m^2 \qquad S_2 = 480{,}2\mu m^2$$

$$Af = 2(S_1 + S_2) = 2(678{,}36 + 480{,}2) = 2317{,}12\mu m^2 \qquad Ae = (40\mu m)(130\mu m) = 5200\mu m^2$$

$$Pc = \left(\frac{3+1}{2}\right)\left(\frac{2317{,}12}{5200}\right)(0{,}21)(7)$$

$$Pc = 0{,}275mW$$



ℓ [dB]=10 log(P.ent/P.sal.)

ℓ [dB]= 10 log $\left(\frac{7mW}{0{,}275mW}\right)$

ℓ [dB]= 14,06dB

$y^2 + x^2 = R^2$ $y = \sqrt{R^2 - x^2}$ R=31,25

$$y = \int_0^{20} \sqrt{(31{,}25)^2 - x^2}\,dx$$

DETECTORES O RECEPTORES OPTICOS

En sistemas con fibra óptica se usan básicamente dos tipos de semiconductores detectores de luz: **Fototransistores y fotodiodos.**

Fototransistores:
A pesar de poseer buena sensibilidad, no posibilitan altas velocidades de transmisión, lo que limita su aplicación.

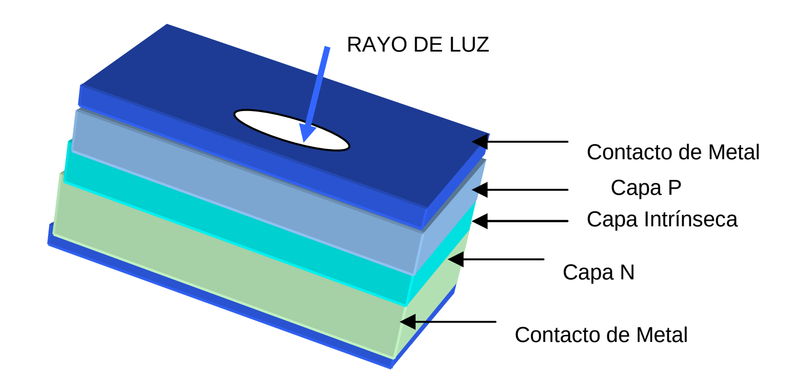
Fotodiodo:
Los Fotodiodos son diodos semiconductores que operan polarizados inversamente. Durante la absorción de la luz, cuando un fotodiodo es iluminado, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, son absorbidas generando pares electrón – hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica. Estos dispositivos son muy rápidos, de alta sensibilidad y pequeñas dimensiones. La corriente eléctrica generada por ellos es del orden de los nanoamperios (10^{-9} A) y por lo tanto se requiere de una amplificación para manipular adecuadamente la señal.

Los fotodiodos actualmente son:

Fotodiodo PIN (Capas Positiva – Intrínseco – Negativo)
Fotodiodo APD (Fotodiodo de Avalancha)

Fotodiodo PIN

Entre los diodos APD y PIN, este último es el más usado como detector de luz en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica. Este fotodiodo esta conformado por una capa intrínseca, casi pura, de material semiconductor, introducida entre la unión de dos capas de materiales semiconductores tipo n y p.



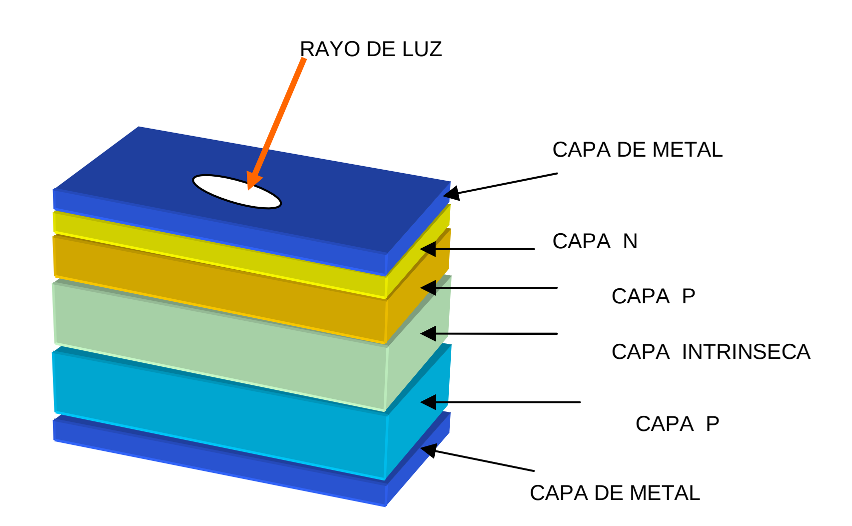
La luz ingresa por la cavidad de detección, la cual es una ventana muy pequeña y es absorbida por el material intrínseco, el cual agrega la energía suficiente para lograr que los electrones se muevan de la banda de valencia a la banda de conducción y se generen portadores de carga eléctrica que permiten que una corriente fluya a través del diodo.

Los elementos mas usados en la fabricación de este tipo de detectores son el Germanio y últimamente se usa el GaAs, GaInAs, InP con resultados muy buenos.

Los fotodiodos PIN requieren bajas tensiones para su funcionamiento, pero deben utilizar muy buenos amplificadores. Presentan tiempos de vida relativamente altos, que podrían reducirse únicamente por factores externos y son los más indicados para el uso en la segunda y tercera ventana de transmisión (1300 y 1550nm)

Fotodiodo A.P.D.

Los fotodiodos de avalancha son una estructura de materiales semiconductores, ordenados en forma P - I – P – N tal como se presenta a continuación:



La luz entra al diodo y es absorbida por la capa n; haciendo que ciertos electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción**.**

Debido al gran campo eléctrico generado por la polarización inversa, los electrones adquieren velocidades muy altas y al chocar con otros electrones adquieren velocidades muy altas y al chocar con otros electrones de otros átomos ionizados ionizan a su vez a otros átomos, desencadenando un efecto de avalancha de corriente fotoeléctrica.

Los fotodiodos de avalancha APD son 10 veces más sensibles que los diodos PIN y requieren de menos amplificación adicional. Su desventaja radica en que los tiempos de transición son muy largos y su vida útil es muy corta.

PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LOS FOTODETECTORES

Respecto a la operatividad que deben poseer los dispositivos fotodetectores interesa definir una serie de parámetros característicos. Los más importantes se resumen a continuación:

1.- EFICIENCIA CUANTICA

Representa el promedio de electrones generados por fotón incidente. Esta expresada por las siguientes relaciones:

$$\eta = \frac{h.v}{q.M}.\left[\frac{I_L}{P_L}\right]$$ Ecuación general para cualquier valor de M

Donde:

h = Constante de Planck
v = Frecuencia de radiación de la señal recibida
M = Ganancia de Avalancha
I_L = Corriente a la salida del dispositivo
P_L = Potencia óptica recibida en la zona activa

Como se sabe: $v = \frac{C}{\lambda}$ por lo tanto la expresión $\frac{h.C}{q} = 1{,}2395$ (W/A.µm) esto determina

que la expresión general quede expresada por:

$$\eta = \frac{1{,}2395}{\lambda.M}.\left[\frac{I_L}{P_L}\right]$$

Cuando M = 1 (Para el caso del Fotodiodo PIN) la ecuación general queda expresada de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{h.v}{q}.\left[\frac{I_L}{P_L}\right] = \frac{1{,}2395}{\lambda}.\left[\frac{I_L}{P_L}\right]$$

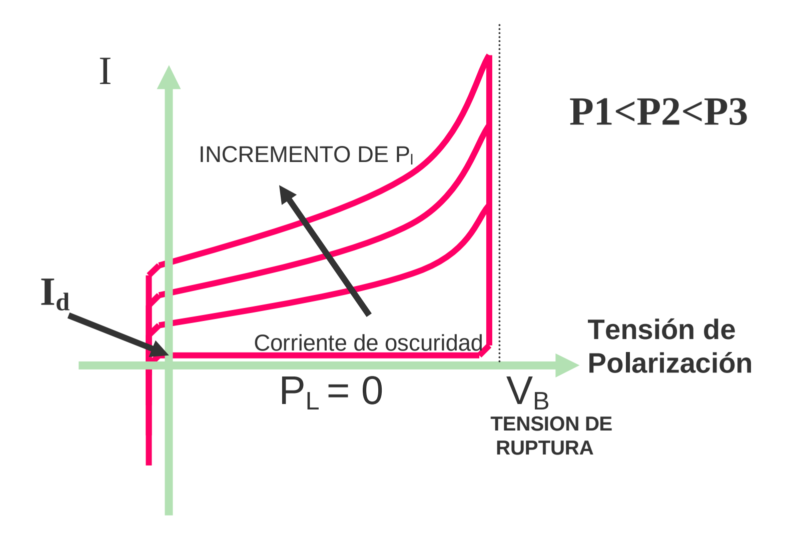
2.- SENSIBILIDAD ESPECTRAL

Es la relación entre la magnitud eléctrica de salida y la potencia óptica de entrada-Corresponde a la responsividad media; dependiendo claramente de la eficiencia cuántica.

$$S_\lambda = \frac{I_L}{P_L}$$

3.- CORRIENTE DE OSCURIDAD

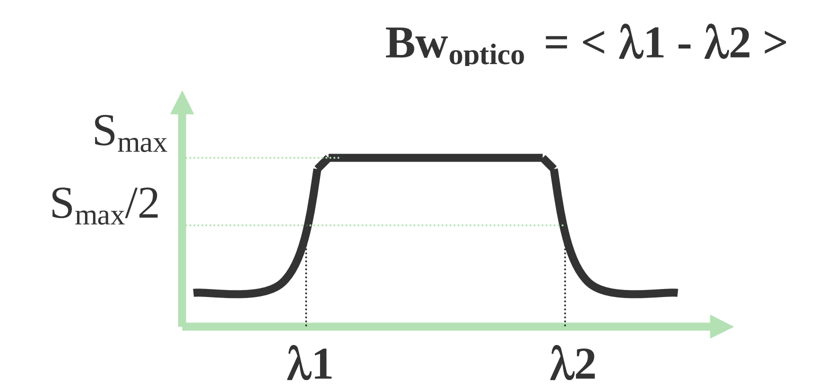
Es la corriente I_d de salida en el detector óptico en ausencia de radiación óptica incidente.



4.- ANCHO DE BANDA OPTICO

Es el ancho espectral para el que corresponde una sensibilidad espectral igual o mayor al 50% del valor máximo.

$$Bw_{optico} = < \lambda 1 - \lambda 2 >$$



5.- ANCHO DE BANDA ELECTRICO

Conjunto de frecuencias que modulando a la radiación óptica pueden ser detectadas con un nivel de potencia igual o mayor al 50% del máximo. En la práctica viene limitado por los parámetros eléctricos:

La Capacidad de la Unión Cd, resistencia aparente en serie del fotodetector Rs y la resistencia efectiva total de carga Rp. El Ancho de Banda electrizo también queda definido por los tiempos de subida y de caída del impulso eléctrico, obtenido como respuesta a un impulso óptico incidente idealmente estrecho.

6.- POTENCIA DE RUIDO EQUIVALENTE - NEP

Potencia óptica de entrada que se requiere para producir una señal eléctrica de salida igual al ruido del fotodetector por unidad de ancho de banda eléctrico. Suele definirse otro parámetro, que es la Detectividad D, como:

$$D = \frac{1}{NEP}$$

7.- GANACIA DE AVALANCHA (M)
Es un parámetro definitorio del efecto multiplicativo por avalancha. Se define como sigue:

$$M = \frac{I_L}{I_P} = \frac{1}{1-\left(\frac{V}{V_B}\right)^n}$$

Donde los diversos factores son:
I_p = Fotocorriente primaria, la que se produciría con baja tensión de polarización, cuando no se da el fenómeno de avalancha.
I_L = Corriente efectiva total.
V_B = Tensión de ruptura, dependiente del material semiconductor y de las concentraciones de impurezas empleadas en la fabricación del diodo en cuestión.
n = Coeficiente que depende del tipo de material semiconductor.
v = Tensión de polarización aplicada.

8.- AREA UTIL DE FOTODETECCION
Según el modelo suele estar entre la equivalente a un circulo desde 50 a 500 micras de diámetro.

9.- APERTURA DE ENTRADA
Es el máximo ángulo de incidencia de la luz para el cual la superficie fotodetectora está totalmente iluminada.

CARACTERISTICAS COMPARATIVAS ENTRE LOS FOTODIODOS PIN Y APD

COSTO:
Los fotodiodos APD son más complejos y por ende más caros.

VIDA UTIL:
Los fotodiodos PIN presentan tiempos de vida útil superiores

TEMPERATURA:
Los fotodiodos APD son más sensibles a las variaciones de temperatura

VELOCIDAD:
Los fotodiodos APD poseen velocidades de respuesta mayores, por lo tanto permiten la transmisión de mayores tasas de información.

CIRCUITOS DEPOLARIZACION:
Los fotodiodos PIN requieren circuitos de polarización más simples, pues trabajan a menores tensiones.

PARAMETROS TIPICOS DE FOTODIODOS DE AVALANCHA

Material	Tensión de Ruptura (volts)	Eficiencia Cuantica η (%) a λ = 850 nm	Diámetro del área activa (µm)	Capacidad de la Unión (pF)	Corriente de Oscuridad (nA)
Silicio	80	18	100	< 2	< 0.1
Silicio	500	50	500	< 3	< 0.5
Germanio	40	40	250	5	200

CAPITULO

7

SISTEMA DE TRANSMISION OPTICO

Parámetros funcionales del sistema
Tabla de los parámetros típicos de los sistemas de fibra óptica
Estrategias para el diseño de sistemas de fibra óptica
Procedimiento para el diseño de un enlace de fibra óptica

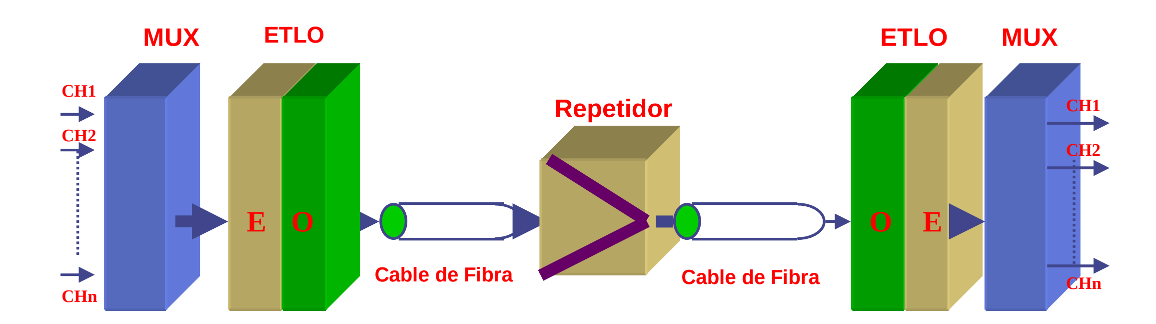
CAPITUL VII

SISTEMA DE TRANSMISION OPTICO

Se ha estudiado en los capítulos anteriores al fundamento físico y las características de los componentes específicos de un sistema de transmisión que utiliza la fibra óptica como portador.

El resto del equipo es en principio, convencional en cuanto al tipo de dispositivos empleados. No obstante, la dedicación concreta a una modalidad de trabajo determinada, ocasiona la existencia de un particular punto de vista de cara al desarrollo del sistema de telecomunicaciones óptico.

El objetivo del presente capitulo es la evaluación de las características funcionales de un sistema de transmisión por fibra óptica.



MUX : Equipo Multiplexor
ETLO: Equipo Terminal de Línea Óptico
E: Parte Eletrônica
O: Parte Óptica

En la figura anterior se muestra el modelo básico del sistema de transmisión que nos ocupa. Además del portador óptico pueden distinguirse tres subsistemas principales: los Equipos Terminales de Línea óptica (E.T.L.O), en Transmisión y Recepción y el Equipo Repetidor óptico (E.R.O).

PARAMETROS FUNCIONALES DEL SISTEMA

Conocido a grandes rasgos la composición de un sistema de telecomunicaciones por fibra óptica, al menos en sus componentes característicos, pasamos a relacionar los parámetros que lo definen funcionalmente. Los más interesantes son:

- Capacidad de Enlace
- Velocidad binaria de transmisión
- Longitud de Enlace
- Tasa de Error o relación S/N críticas aceptables.
- Código de Línea
- Tipo de Emisor
- Potencia en la fibra disponible en el extremo de emisión.
- Tipo de Foto detector
- Márgenes de pérdidas del sistema.
- Sensibilidad del receptor
- Tipo de fibra
- Técnica de conectores y empalmes
- Telealimentación de los repetidores.

La capacidad del enlace y la velocidad binaria están correlacionadas y vienen impuestas a partir de las necesidades de planta y serán el punto de arranque para determinar la jerarquía PCM a instrumentar.

Puesto que la capacidad máxima de una ruta no suele equiparse de entrada es imprescindible conocer la tasa anual de crecimiento prevista, con el fin de sopesar la configuración más interesante.

La longitud de enlace también está determinada por razones de planta. Será cubierta a base de un cierto número de tramos, o secciones de repetición, obtenidos tras el empalme del contenido de varias bobinas de cable. En gran número de aplicaciones no será necesario el empleo de repetidores intermedios, dado el gran alcance virtual obtenido con los sistemas ópticos sobre fibra. O bien será fácil hacer coincidir los puntos de repetición con estaciones intermedias, dotadas con alimentación local o alimentación propia.

La tasa máxima de errores permitidos, que también se puede expresar en términos de señal/ ruido, es un parámetro puramente técnico que define la calidad de la transmisión. En ocasiones se habla de una cualidad recíproca llamada tiempo (en segundos) libre de errores. Como ya se ha mencionado, es una deducción obtenida de la señal una vez regenerada y decodificada. Veremos en un posterior estudio la ligazón que relaciona la calidad de la transmisión con la potencia óptica detectable. El hecho de mejorar la magnitud de la tasa de errores se paga con un receptor más sensible y exento de ruido, o un emisor más potente, o una fibra de mayor calidad, o tramos de repetición más cortos.

En cuanto a los códigos de línea ya se ha comentado todo lo que consideramos debe ser analizado al respecto en un estudio de tipo general. Recordemos que el empleo del código de línea implica una penalización a pagar en cuanto obliga a incrementar la velocidad en línea.

Sobre la potencia inyectada a la fibra en el extremo de emisión cabe decir que es función del tipo de emisor, su radiancia, su lóbulo de emisión y la apertura numérica de la fibra. Por consiguiente son de tener en cuenta las perdidas de acoplo emisor – fibra y las correspondientes y la correspondiente a una conexión fibra-fibra (que debe ser desmontable por facilidad de manipulación) antes de que el cable de las fibras ingrese en las canalizaciones, u otra forma de tendido. El resto de las conexiones deberán ser fijas y a ser posible obtenidas por fusión, hasta llegar al punto de repetición donde existirá otro conector desmontable.

Son muy de desear los dispositivos emisores y detectores dotados de un cabo de fibra embutida en circunstancias de acoplo optimo. Frente a esta posibilidad debe desecharse cualquier otra, por bueno que se muestre el conector dispositivo – fibra en consideración, sobre todo con respecto al emisor.

Con el termino **Márgenes del sistema** se designa una serie de conceptos más o menos relacionados.

Por margen del sistema, sin mas, suele entenderse a la diferencia (en dB) entre la potencia disponible a la entrada de la fibra en emisión y la sensibilidad del receptor, para una tasa de errores dada. El margen del sistema corresponde, pues a las máximas perdidas que pueden tolerarse manteniendo la calidad especificada (incluyendo todos los conceptos: como son atenuación de la fibra, pérdidas en empalmes y conectores, margen de seguridad, etc.)

El Margen de mantenimiento o seguridad, representa una cantidad de potencia después de haber considerado todas perdidas, respecto del margen del sistema, para absorber variaciones más o menos previsibles de la señal que llega al foto detector. Un efecto que se prevé compensar con este margen es el de variación por degradación o envejecimiento, de las características de los emisores sobre todo en el caso de los diodos láser. Normalmente se suele reservar 7 dB en el caso del LED y 9dB cuando se trata de dispositivos tipo LD.

Respecto a la fibra ya se ha expuesto respecto de sus características de transmisión.

Finalmente sobre la telealimentación apuntamos la idea, contemplada por ciertos fabricantes y consumidores de estos productos de integrar en un mismo cable no sólo las fibras ópticas y el tensor central (de acero o fibra sintética de gran resistencia a la tracción: KEVLAR, Terylene, Nylon, etc.) sino también una serie de portadores de cobre dispuestos para conducir la corriente de telealimentación de los eventuales repetidores intermedios.

En la siguiente tabla aparecen, entre otros, las ordenes de magnitud de potencia inyectada a la fibra para diversas soluciones.

TABLA DE LOS PARAMETROS TIPICOS DE SISTEMAS DE FIBRA OPTICA

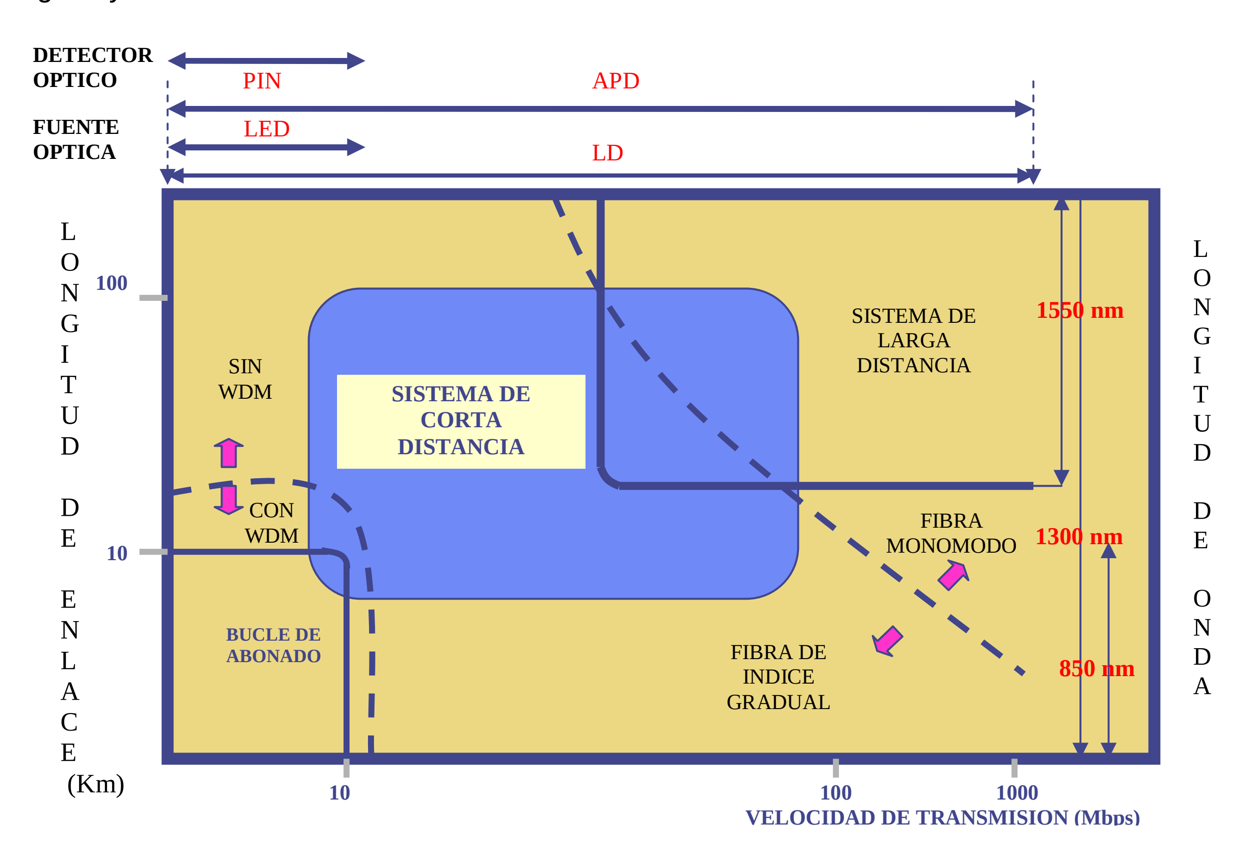
Ancho Espectral de la fuente entre semimáximos $\Delta\lambda(nm)$	55 para LED a λo = 840 nm 35 para LED a λo = 900 nm 90 para LED a λo = 1300 nm 2 para LASER a λo = 820 nm 10 para LASER a λo = 1300 nm
Potencia óptica inyectada en la fibra P (dBm)	* -18 para el LED * -3 para el láser a λo = 820 nm * -6 para laser a λo = 1300 nm
Código de línea	5B6B
Forma de los Impulsos inyectados	Rectangular con ciclo de trabajo del 50%
Sensibilidad del receptor APD de la primera ventana S (Pe= 10^{-9}) (dBm)	• - 42 para 564,992 Mbps • - 49.5 para 139,264 Mbps • - 56.5 para 34,368 Mbps
Sensibilidad del receptor PIN-FET de la primera ventana S (Pe= 10^{-9}) (dBm)	• - 37 para 564,992 Mbps • - 49.5 para 139,264 Mbps • - 49.5 para 34,368 Mbps
Forma del impulso ecualizado	Coseno realzado con factor de pendiente β = 0,6
Coeficiente de dispersión debida al material (pseg/nm.km)	100 a λo = 840 nm 80 a λo = 900 nm 5 a λo = 1300 nm
Pérdida global en conectores y empalmes de equipos α_C (dB)	4
Perdida equivalente en empalmes de línea α_E (dB/km)	0.3
Margen de Seguridad MS (dB)	7 para el LED 9 para el LASER
Factor de dependencia E del Ancho de Banda Modal con respecto a la longitud de la fibra	0.6 – 0.8

Como ya se ha señalado, los largos trazados conseguidos sin repetición en comunicaciones ópticas, pueden relegar la necesidad de telealimentación a casos más bien excepcionales, al posibilitar la alimentación local. Por ello los cables normales no suele ir provistos de conductores para telealimentación, aunque si existe la opción bajo pedido a los fabricantes. Para los sistemas de comunicaciones submarinas, en cambio, los portadores para telealimentación son imprescindibles

ESTRATEGIAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICAS

Una vez que ya se ha definido el uso de un sistema de fibra óptica definiendo su aplicación y la velocidad digital necesaria, se deberá proceder en forma alternativa acotando todos los componentes, teniendo en cuenta las normalizaciones internacionales al respecto (recomendación G.703 de la UIT-T, en cuanto a interfaces con el equipo multiplexor, Rec. G.900 sobre los parámetros que afectan la calidad de transmisión, etc.) y en base a criterios mas o menos parecidos a los que se muestran en el presente estudio.

Una posible forma de actuar se ofrece como alternativa en la figura siguiente, en la que se puede determinar las características de los componentes a usar de acuerdo a los parámetros de longitud y velocidad de transmisión de la señal:



Para el cálculo de longitud del enlace sin repetidoras veremos sendos métodos basados en la determinación previa de la sensibilidad del receptor y el margen del sistema, y en la limitación por ancho de banda de la portadora.

En cuanto a la selección del tipo de fibra aportaremos algún dato más, con el fin de precisar la atenuación global partiendo de los datos exhibidos por los fabricantes.

La frecuencia de la luz, es decir la ventana del infrarrojo, elegida se define a partir del alcance esperado, o en base a criterios económicos, ya que los dispositivos trabajando en la 2da ventana y sobretodo en la 3era, no solo son mas caros sino, en ocasiones, de difícil disponibilidad. No obstante estas dificultades han de atenuarse conforme aumenta la difusión de su uso.

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN ENLACE

El diseño se fundamenta básicamente en hallar la potencia mínima del transmisor (fuente), para así entrar a seleccionar el dispositivo adecuado para el sistema, ya sea LED o LASER, utilizando para ello la siguiente formula:

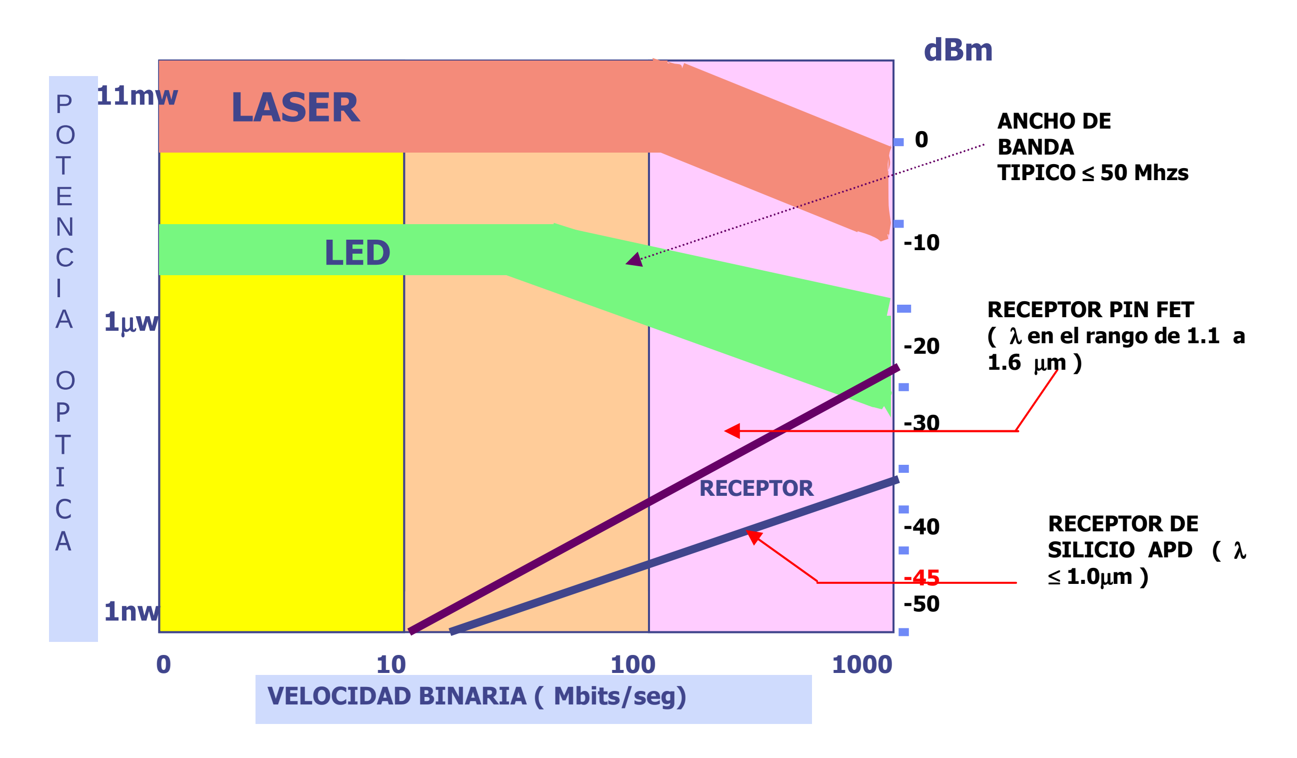
$$P_{\min}(Tx) = P(Rx) + A + AM$$

Donde:

P (Rx) = Es la potencia óptica que requiere el receptor.
A = Es la atenuación total del sistema
AM = Es la atenuación por margen de degradación del sistema.

El procedimiento para el diseño es el siguiente:

1.- Determinar la potencia óptica requerida (dBm) en el receptor.
Esta se obtiene de la gráfica que relaciona al margen de potencia de transmisión (dBm), con la velocidad de transmisión (Mbps).



2.- Calculo de la Atenuación total del sistema (A)
El valor se determina por la siguiente relación:

$$A = A_F + A_E + A_C + A_I$$

Donde: A_F = Es la atenuación de la fibra óptica (dB/km)
A_E = Es la atenuación debida a los empalmes.
A_C = Es la atenuación debida a los conectores pigtail
A_I = Es la atenuación total por inserción (Tx + Rx)

3.- Determinación de la atenuación por margen de degradación tanto de la fuente como del receptor (AM)

Los siguientes son los valores más típicos que se deben tener en cuenta, para determinar las atenuaciones de que hablan los numerales 2 y 3:

Atenuación en la Fibra (A_F)

Fibra multimodo 62.5/125 μm

λ = 850 nm Atenuación = 4 dB/km
λ = 1300 nm Atenuación = 2 dB/km

Fibra Monomodo 9/125 μm

λ = 1300 nm Atenuación = 0.5 dB/km
λ = 1550 nm Atenuación = 0.2 dB/km

Atenuación por empalmes (A_E)
Normalmente y con la tecnología de empalmes actual, la atenuación en cada empalme de fibra óptica es de 0.2 dB.

Atenuación por Conectores (A_C)
La atenuación de los pigtail a la fuente o al receptor es de 3.5 dB.

Atenuación por Inserción en el Transmisor (A_I)
Atenuación por inserción del LED: = 15 dB
Atenuación por inserción del LD: = 3 dB

La atenuación por inserción en el receptor es despreciable, ≈ 0 dB.

Atenuación por Margen de Degradación (AM)
La atenuación por margen de degradación de todo sistema, es de 5 dB.

Ejercicio Nº 1

Elaborar el diseño para unir, por medio de fibra óptica, dos equipos de cómputo que se encuentran separados 1 km de distancia y que necesitan comunicar información a una velocidad de 10 Mbps. Por costos, se esta utilizando un receptor tipo PIN.

1.- Determinación de la potencia en el receptor
En la figura que nos permite determinar la potencia en el receptor, para una velocidad de transmisión de 10 Mbps; se requiere en el receptor tipo PIN una potencia mínima de luz de – 60 dBm.

2.- Atenuación total del sistema (A).

$$A = A_F + A_E + A_C + A_I$$

Suponemos que el enlace lo podemos hacer con fibra multimodo a un λ = 1300 nm.

$$A_F = 2.0 \frac{dB}{km} x1km = 2.0dB$$

Suponemos que hay dos empalmes, uno en cada caja terminal.

$$A_E = 2x0.2dB = 0.4dB$$

En el diseño deben ir dos conectores unidos a cada pigtail (en la fuente y en el receptor).

$$A_C = 2x3.5dB = 7.0dB$$

Suponemos que podemos utilizar un LED como fuente.

$$A_I = 15.0dB$$

Entonces, de acuerdo con la fórmula de atenuación total del sistema, tenemos:

$$A = 2.0dB + 0.4dB + 7.0dB + 15.0dB = 24.4dB$$

3.- Atenuación por Margen de degradación del sistema (AM)

$$AM = 5.0dB$$

En conclusión:

$$P_{\min}(Tx) = P(Rx) + A + AM$$
$$P_{\min}(Tx) = -60.0dBm + 24.4dB + 5.0dB$$
$$P_{\min}(Tx) = -30.6dBm$$

Si volvemos a observar la misma figura, vemos que el LED nos puede otorgar una potencia de -15 dBm, la cual es muy superior a la que estamos requiriendo para la fuente, que es de -30.6 dBm, de acuerdo con el valor hallado anteriormente. En conclusión puedo usar un LED como fuente.

Ejercicio Nº 2

Se desea hacer una conexión entre dos redes LAN (Local Área Network) que distan 70 kms entre si y cuya velocidad de transmisión requerida entre ellas, es de 100 Mbps.

Para el diseño se considerarán los siguientes aspectos.

Se requiere de fibra óptica monomodo a 1300nm
Se efectuaran empalmes en la fibra óptica cada 2 Kms.
Se utilizará un receptor del tipo PIN.

1.- Determinación de la potencia en el receptor

En la figura de determinación de la potencia presente en el receptor, se puede observar que para una velocidad de transmisión de 100 Mbps, se requiere en el receptor tipo PIN una potencia mínima de luz de – 45 dBm.

2.- Atenuación total del sistema (A).

$$A = A_F + A_E + A_C + A_I$$

La atenuación debido a la fibra óptica es:

$$A_F = 0.5\frac{dB}{km} x 70km = 35dB$$

En una red, el número de empalmes de campo, sin contar los terminales, se define así:

$$N^{o}_{empalmes} = \left[\frac{Longitud_{TOTALDELCABLE}}{Longitud_{ENTREEMPALMES}}\right] - 1$$

Entonces:

$$N^{o}_{EMPALMES} = \left(\frac{70kms}{2kms}\right) - 1 = 34$$

Como deben de existir 2 empalmes terminales:

$$N^o_{\ total\ de\ empalmes} = 34 + 2 = 36$$

Entonces: $A_E = 36x0.2dB = 7.2dB$

En el diseño deben de ir dos conectores unidos a cada pigtail, uno en la fuente y otro en el receptor.

$$A_C = 2x3.5 = 7.0dB$$

Suponemos que podemos utilizar un LASER como fuente.

$$A_I = 3.0dB$$

Entonces, de acuerdo con la formula de atenuación total del sistema, tenemos:

$$A = 35.0dB + 7.2dB + 7.0dB + 3.0dB = 52.2dB$$

3.- Atenuación por margen de degradación del sistema (AM)

$$AM = 5.0\ dB$$

En conclusión:

$$P_{\min}(Tx) = P(Rx) + A + AM$$
$$P_{\min}(Tx) = -45.0dBm + 52.2dB + 5.0dB$$
$$P_{\min}(Tx) = 12.2dBm$$

Vemos que nos da una potencia positiva (+12.2 dBm) y no hay un LASER que trabaje con esta potencia. Debemos entonces buscar una fibra con menor atenuación, o reducir el número de empalmes en el cable.

Si consideramos el primer caso, podremos utilizar fibras ópticas monomodo, para 1550 nm, con atenuaciones de 0.2 dB/km.

Retomando el ejercicio, tendríamos:

$$A_F = 0.2\frac{dB}{km}x70km = 14.0dB$$

Entonces, la atenuación total quedaría:

$$A = 14.0dB + 7.2dB + 7.0dB + 3.0dB = 31.2dB$$

Por lo tanto:

$$P_{\min} = (Tx) = P(Rx) + A + AM$$
$$P_{\min} = -45dBm + 31.2dB + 5.0dB$$
$$P_{\min}(Tx) = -8.8dBm$$

En este rango, de acuerdo a la figura de determinación de la potencia presente en el receptor, si puede trabajar el diodo LASER como fuente.

PROBLEMAS Y EJERCICIOS

1.- En una F.O. de 1 Km de longitud cuyo índice del núcleo n1= 1.48 y n2=1.46, el diámetro del núcleo de la F.O. es de 50 μm. Se utiliza una luz roja para excitar a la F.O. (λ=600 μm).
Calcular:

a) λc b) despersion modal (ηs / Km.), c) BW d) Numero de nodos

2.- Una FO_{SM} tiene un diámetro de núcleo de 8.7 μm el n_1=1.45 Δ=0.3% esta F.O. opera en 1.55 μm la atenuación de la fibra a esta longitud es de 0.25 dB/Km. Calcular:

a) Verificar que se trata de una fibra monomodo
b) El espaciamiento en Km entre repetidoras .Sabiendo que entre ellas hay una perdida acumulada de 20dB
c) λc en el cual la fibra se vuelva multimodo

3.- Una FO_{SM} con diámetro de núcleo de 8μm y con n_1=1.5 Δ=0.3% que opera en 1.55 μm calcular:

a) El radio critico de curvatura b) La λ a la cual se vuelve multimodo

4.- Se tiene un FO_{SM} de índice escalón cuya diferencia de cuadrados de índices es igual a 0.5% (n_1^2-n_2^2 = 0.5%), calcular:

a) El radio del núcleo sabiendo que λc=1μm (rsta: a=5.416μm)
b) El diámetro del campo modal si la fibra es usada a 1.3μm (rsta: 2Wo=15.21μm)

5.- Un sistema que opera a 1.3μm es usada en enlace de FO. De 50Km, el umbral de recepción del receptor óptico es de 0.3mW. Las pérdidas en la FO. Es de 0.5db/Km. La FO. Es empalmada cada 5 Km , tiene 2 conectores de 1dB de perdida por cada uno de ellos . Las perdidas en los empalmes son de 0.2 dB por empalme. Calcular la potencia minima que debe ser inyectado a la FO: y expresarla en dBm y en mW.

6.- Calcular la dispersión modal de FO_{MM} en ηs / Km. Sabiendo que n_1=1.5 Δ=1% n_2=1.4849 → $\Delta t/L$=0.0508 ηs / Km.

7.- Calcular el diámetro del campo modal de una FO_{SM} de 9/125 μm cuando trabaja en la 2° y 3° ventana.

8.- La luz blanca está compuesta por la combinación de todo el espectro visible. El índice de refracción n para la mayor parte de los materiales es una función débilmente dependiente de la longitud de onda λ frecuentemente descrita por la ecuación de Cauchy:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Un rayo de luz blanca incide con un ángulo de 30º a una interfaz de vidrio, la cual tiene parámetros A= 1.5 y B= $5x10^{-15}$ m^2 . ¿Cuáles son los ángulos para los cuales son transmitidos los rayos de color violeta (400nm), azul (450nm), verde (550nm), amarillo (600nm), naranjo (650nm) y rojo (700nm)?

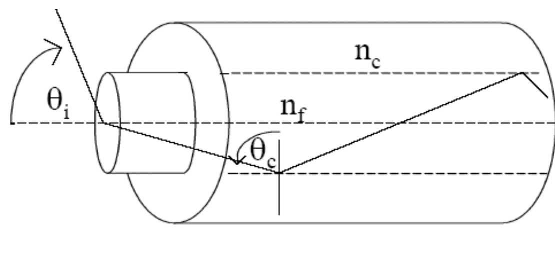
9.- Determine la longitud de onda de corte (λc) para una fibra monomodo con índice de refracción escalón (step index) que tiene las siguientes dimensiones:
n nucleo = 1,46 radio = 4,5μm
La diferencia relativa del índice de refracción es Δ = 0.25%

10.- Una fibra multimodo con índice escalón con núcleo de diámetro 80μm y una diferencia relativa de índice de 1,5%, está operando a una longitud de onda de 0,85μm. Si el índice de refracción del núcleo es de 1,48 estime:

a) La frecuencia normalizada (V-number).
b) El número de modos que pueden ser guiadas.

11.- La figura representa una fibra de vidrio delgada con índice de refracción nf, rodeada por un manto de menor densidad con índice de refracción nc. Hay un ángulo de incidencia máximo $\theta_i = \theta_{max}$ tal que cualquier rayo que incida sobre la cara a un ángulo $\theta_i > \theta_{max}$ llegará a la pared interior a un ángulo menor que el ángulo crítico λc y no será reflejado totalmente en el interior. Demostrar que:

$$Sen\theta_{max} = \frac{1}{n_0}(n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$$



n_o

12.- Un sistema que opera a una longitud de onda de 1.3µm, usado para un enlace de fibra de 50Km requiere como mínimo 0,3mW en el detector (para su detección). Las pérdidas de la fibra son de 0,5dB/Km. La fibra es empalmada cada 5Km y tiene dos conectores de 1dB de pérdida en cada conector. Las pérdidas en los empalmes son de solo 0,2dB/splice. Determine la potencia mínima que debe ser inyectada a la fibra, en dBm y en mW.

13.- Un pulso de 100ns es enviado en una fibra de 20km. La longitud de onda de la luz empleada es de 1550nm. Al salir de la fibra, el ancho del pulso es de 400ns. ¿Cuánto es la dispersión en la fibra?

14.- Una fibra monomodo tiene un índice escalón:

$$n_1^2 - n_2^2 = 0.005$$

Sabiendo que:

$$\frac{P_{nucleo}}{P_{manto}} = \frac{2\sqrt{2}}{3V}$$

a) Calcule el radio de núcleo si la fibra tiene una longitud de onda de corte de 1 µm.
b) ¿Cuál es la fracción de la potencia en el núcleo cuando esta fibra es usada a 1.3 µm?

15.- Calcular la apertura numérica de una fibra de Salto de Índice cuyos IR es n_1=1,48 y n_2=1,46. Cual en el ángulo de aceptación máximo en la cara de la fibra desde el aire (n=1).

16.- Considerar en una fibra cuyo n_1= 1,458. Calcular: a) los valores de n_2, b) de AN y c) AN aproximados [$AN \cong n1\,(\Delta)^{1/2}$] correspondientes a valores de la diferencia relativa de los índices de refracción (Δ) de: 0,1%; 0,5%; 1% y 2%

17.- a) Determinar la frecuencia característica (normalizada) a 820 nm para una fibra de Salto de Índice que tienen un radio del núcleo de 25 µm, n_1= 1.48, y n_2 = 1.46.
¿Cuantos modos se propagan en esta fibra para las siguientes λs?
a) 820 nm
b) 1320 nm
c) 1550 nm.

18.- Sea una fibra de Índice Gradual con una distribución parabólica del IR en el núcleo. El IR en el eje es de 1,5 y la diferencia relativa de IR es del 1 %. Calcular el máximo diámetro del núcleo que permite que la fibra trabaje como monomodo a una longitud de onda de 1,3 µm.

19.- Considerar una fibra SI que tiene núcleo 25 µm de radio, n_1= 1.48, y $\Delta = 0{,}01$.
a) Si λ= 1320 nm, cual es el valor de V y cuantos modos se propagan?

b) Que porcentaje de potencia óptica se propaga por la envoltura?
c) Si la diferencia relativa del IR se reduce al 0,3 %, cuantos modos soporta la fibra y cual es la fracción de la potencia que se propaga por la envoltura?

20.- a) Cual es el radio de núcleo necesario para una fibra de Salto de Índice de n1 = 1.480 y n2 = 1.478 opere como monomodo a 1320 nm.
b) Cuales son los valores de la apertura numérica y el ángulo de aceptación máximo?

21.- Un fabricante desea construir una fibra se Salto de Índice con V= 75 y una AN= 0,30 para operar a 820 nm. Si n1= 1.458, Cual debería ser el tamaño del núcleo y el índice de refracción de la envoltura,

22.- Calcular el número de modos a 820 nm y a 1,3 nm en una fibra de Índice Gradual que tiene un perfil de IR parabólico (α=2), un radio del núcleo de 25 μm, n(0)= 1,48 y n2=1,46.
Comparar con una fibra de Salto de Índice.

23.- Determinar la Longitud de Onda de Corte para una fibra SI, si el índice de refracción y el diámetro del núcleo son 1,46 y 4,4 μm, respectivamente, y la diferencia relativa de los índice de refracción es del 0,25%.
Calcular el índice de refracción de la envoltura.

24.- Calcular las aperturas numéricas de las siguientes fibras:
a) Plástico; n1= 1,60 y n2=1,49
b) Salto de Índice: núcleo de Sílice, n1=1,458 y envoltura de resina de silicona n2=1,405

25.- Se dispone de una preforma que tiene un diámetro de 6 mm.
A) Cual es la longitud de fibra de 125 μm de diámetro exterior que se puede producir si la preforma tiene una longitud útil de 1 metro.
B) Si la velocidad de estirado es del 1,2 m/s. Cual es la velocidad de alimentación de la preforma.

26.- Un tubo de sílice tiene 3 mm y 4 mm de radios interior y exterior, respectivamente. Para crear una preforma es necesario depositar material de vidrio en la superficie interior. Cual sería el espesor a depositar para obtener una fibra cuyos diámetros del núcleo y envoltura sea de 50 μm y 125 μm, respectivamente.

27.- Calcular la relación Ps/Pe (Ps: Potencia de salida y Pe: Potencia de entrada) correspondiente a un dispositivo óptico cuyo valor expresado en dB es:
+/- 1, 2,…..10.

X (dB)	**+/- 1**	**+/- 2**	**+/- 3**	**+/- 4**	**+/- 5**	**+/- 6**	**+/- 7**	**+/- 8**	**+/- 9**	**+/- 10**
Ps/Pe										
Ps/Pe										

28.- Completar la fila correspondiente de la siguiente tabla:

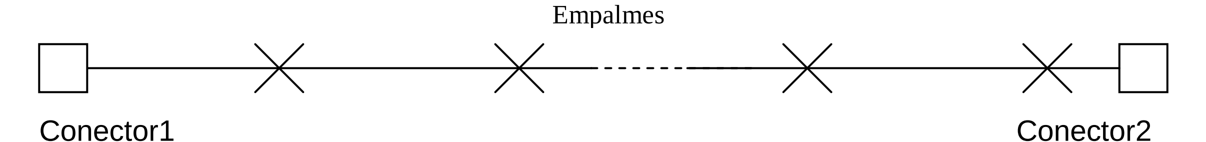
Ganancia (Ps/Pe)	2		1			100		
dB				-6			23	
Pérdida (Ps/Pe)		0,5	1		0,1			0,001

29.- La potencia media que se acopla en una fibra de 8 km de longitud es de 120 μW y la potencia media de salida es de 3 μW, Calcular:
a) Atenuación total de la señal en dB.
b) Atenuación por km (dB/km)
c) Atenuación de la señal si la longitud fuese de 10 km y se realizara un empalme cada 1 km. Pérdidas por empalme 1 dB.

d) Relación de Pe/Ps. Pe: potencia de entrada y Ps: Potencia de salida en el caso c).
Solución: a)16.0 dB; b) 2.0 dB/km; c) 29 km; d) 794.3

30.- Una fibra de 30 km de longitud tiene una atenuación de 0.8 dB/km a 1300 nm. Cual será la Potencia de salida si la potencia de entrada es de 200 μW.
Solución: 0.79 μW

31.- Calcular la longitud de un tendido de fibra óptica de la Figura que tenga unas pérdidas de 30 dB.



Pérdidas del conector (1 y 2) : 0,5 dB, Pérdidas del empalme (X) : 0,1 dB
1 empalme cada: a) 1 km ; b) 2 km, Atenuación de la fibra: 1 dB/km

31.- Sea una línea caracterizada por unas pérdidas de 20 dB. La potencia de la señal a la entrada es de 0,5 vatios y el nivel de ruido a la salida es de 4,5 □vatios. Calcular la relación señal ruido en dB.

32.- Una fibra multimodo de IG produce un ensanchamiento de los impulsos (τ) de 0,1 μs en una distancia de 15 km. Estimar:
a) Máxima tasa binaria, R(bit/s) del enlace para que no se produzca Interferencia entre Símbolos (ISI).
b) Anchura de banda, B (Hz) requerida.
b) Dispersión por unidad de longitud (ns/km).
c) Producto BxL de la fibra.
Solución: a) 5 Mbit/s b) 5 MHz; c) 6,67 ns km^{-1}; d) 75 MHzxkm.

33.- Estimar el ensanchamiento del impulso por km para la fibra del ejemplo anterior cuando la fuente de luz es un diodo láser que tiene una anchura espectral relativa ($\Delta\lambda/\lambda$) de 0,0012 a λ= 0,85 μm.
Solución: 0,10 ns km^{-1}

34.- Un enlace óptico de 6 km tiene una fibra SI con $n_1 = 1,5$ y $\Delta = 1\%$. Estimar: a) La diferencia de retardo Δt entre el modo mas lento y el mas rápido al final de la fibra. b) La máxima velocidad de transmisión que se puede transmitir sin tener demasiados errores en el enlace (duración de bit = 2. τ) y c) Producto B x L (MHz. km).
Considerar la dispersión de la fibra $\tau = \Delta t$
Solución: a) 300 ns; b) R(max) = 1,7 Mbit/s y c) 10 MHz.km

35.- Sea una fibra MM SI tiene una AN= 0,3 y n1=1,45. La dispersión modal es el 1/3,5 veces el retardo entre los dos modos extremo y la dispersión del material es 250 ps. $nm^{-1}km^{-1}$. A) Estimar el parámetro de dispersión total de dicha fibra ($\sigma_{total} = (\sigma_{mat}^2 + \sigma_{modal}^2)^{1/2}$ si se utiliza como fuente de luz un diodo led con una anchura espectral de 50 nm y B) Estimar el producto BxL (MHz. km). Utilizar la expresión BxL= 0,35 . $1/\sigma_{total}$
Solución: A) 32,1 ns/km; B) 10,9 MHz. km.

36.- Una fibra monomodo típica tiene una longitud de onda de dispersión nula (λ_0) de 1.31 μm, con una pendiente de dispersión de 0,09 ps $nm^{-2}km^{-1}$. Calcular la dispersión de la fibra a A) 1280 nm y B) 1550 nm.
Solución: A) -2,8 ps $nm^{-1}km^{-1}$. B) 17,1 ps $nm^{-1}km^{-1}$

37.- Una fibra multimodo SI tiene n1=1,46. Determinar las pérdidas debidas a la reflexión de Fresnel al unirse con otra fibra de iguales características en los siguientes casos:
A) existe una pequeña capa de aire entre ambas caras
B) se deposita una sustancia con un índice de refracción de 1,40
Solución: A) 0,31 dB; B) 3,8 10^{-4} dB

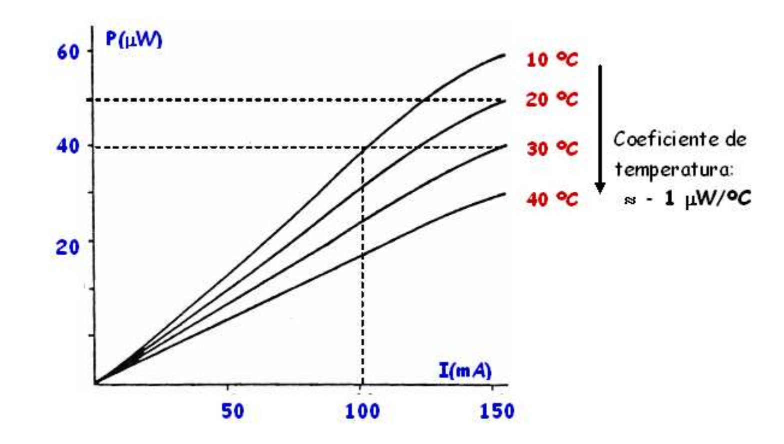
38.- Considerar dos fibras, 1 y 2, multimodo GI que tienen las características indicadas en la tabla adjunta. Si las dos fibras están perfectamente alineadas y en contacto físico (sin que exista capa de aire entre ellas)

Parámetro	Fibra 1	Fibra 2
n1	1,46	1,48
Δ	0,010	0,015
a	50 μm	62,5 μm
α	2,00	1,8

Calcular las pérdidas del empalme en los siguientes casos:
A) La luz va de la fibra 1 a la fibra 2
B) La luz va de la fibra 2 a la fibra 1

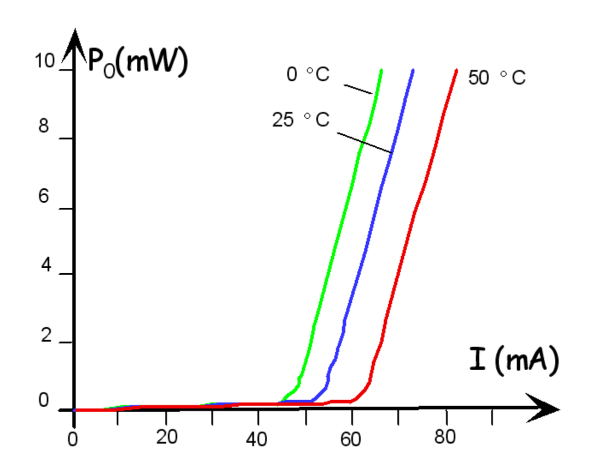
39.- e dispone de una fuente lambertiana (cos θ) con una radiancia de 150 W $sr^{-1}cm^{-1}$ y una superficie emisora circular de diámetro de 70 μm. Calcular la potencia acoplada a fibras multimodo SI de n1=1,5 y AN = 0,2 y con los siguientes diámetros núcleo/envoltura:
A) 50/125 μm; B) 100/140 μm.
C) analizar cual sería la potencia acoplada en las correspondientes fibras de IG (α =2)

40.- La figura muestra la curva P(I), referida a la potencia acoplada a una fibra, correspondiente a un LED de borde a 850 nm. Calcular la eficiencia de la conversión E/O para I= 100 mA; V= 1,5 V a las temperatura de 20º y 30 º



41.- Se dispone de dos fuentes de luz como la descrita en el ejercicio anterior, cada una emitiendo una λ diferente: 900 nm y 1300 nm
A) ¿Depende la potencia acoplada en la fibra de la λ de operación?.
B) Calcular la potencia acoplada por modo de propagación en las fibras descritas en el ejercicio 2 para las λs anteriores.

42.- La figura adjunta muestra la curva P(I), referida a la potencia emitida por un diodo LASER a diferentes temperatura ambiente. Si la eficiencia del acoplamiento a una fibra es del 20 %



a) Calcular la potencia de salida de la fibra cuando la corriente de excitación continua es 62,5 mA y la temperatura de trabajo es 25 ºC.
b) Estimar el valor de la corriente umbral, Ith, a dicha temperatura.
c) Si aumentara la temperatura a 30ºC, cuanto disminuiría la potencia luminosa.
d) Si utilizamos el LD como fuente de luz del TX de enlaces de F.O, de 1 Gb/s y y 2 Gb/s, sin repetidores, de 60 km de longitud. Calcular a la salida de la fibra la potencia luminosa.
e) Datos: Pérdida en cada conector extremo 0, 5 dB; Atenuación fibra + pérdidas empalmes: 0,35 dB/km; Dispersión fibra para dicho LD 5 ps/km.

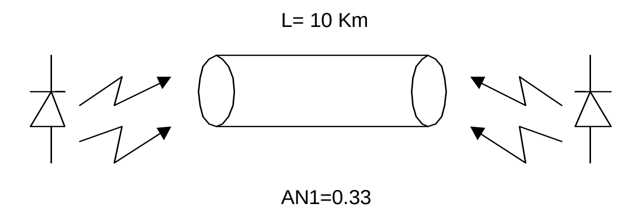
43.- En un fotodiodo, con una Responsividad de 0,65 A/W, inciden fotones cuya energía es 1,53 10^{-19} Jul. Calcular: A) fotocorriente generada si incide una potencia luminosa de 10 μW. B) eficiencia cuántica. C) λ de la radiación.
Solución:
A) 6,5 μA.
B) 0,62.
C) 1,3 μm

44.- La eficiencia cuántica de un fotodiodo de InGaAs en el rango de 1300 a 1600 nm es del 90 %. Calcular:
A) la responsividad para λ 1300 nm y 1600 nm.
B) λ de corte, si el material es $In_{0.53}$ $Ga_{0.47}$ As y tiene una banda prohibida Eg = 0,73 eV.
Solución: A) 0,9 A/W (λ=1300 nm); 1,2 A/W (1600 nm).
B) 1,7 μm.

45.-Un fotodiodo de avalancha de Si tiene una eficiencia cuántica del 65 % a una λ de 900 nm. Si una potencia luminosa de 0,5 μW produce una fotocorriente de 10 μA. Cual es el factor de multiplcación M?
Solución: 42.

46.- La λ de operación de un sistema óptico es 1300 nm. El transmisor de emite una potencia media, P_0, de 0,5 mW, y el receptor óptico (RX) tiene una sensibilidad, S, de 1000 fotones por bit, Calcular para las siguientes velocidades 500 Mbit/s, 1 Gbit/s y 5 Gbit/s: A) Sensibilidad de RX en dBm. B) margen de potencia, P_0 – S (dB).
Solución.
A) -41 dbm; -38 dBm; -31 dBm
B) 38 dB; 35 dB; 28 dB

47.- Un diodo láser ha logrado acoplar dentro de una FO. de 50μW de potencia trabajando con una luz de 1300 ηm, la FO. tiene un diámetro de núcleo = 100ηm. una longitud total de 10Km con una perdida de 0.12 db. / Km. La AN = 0.33, En el extremo de recepción se utiliza un diodo detector de 0.22 de AN y 80% de eficiencia cuantiíca. Calcular la corriente generada por el detector óptico en μA.



Pc = 50μW α = 0.12 db/Km   AN = 0.22

η = 80%

BIBLIOGRAFIA

- Juan Bedmar Izquierdo, TELECOMUNICACION A TRAVES DE FIBRAS OPTICAS (Teoría y Practica), Colección Técnica AHCIET – ICI

- Bob Chomycz, INSTALACIONES DE FIBRA OPTICA, Mc Graw Hill 2000

- INICTEL, FUNDAMENTOS DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA

- María Carmen España Boquera, COMUNICACIONES OPTICAS, Ediciones Diaz de Santos S.A. 2005

- Reinaldo Marín Salazar y Luís Fernando Vélez Cano, FUNDAMENTOS DE FIBRA ÓPTICA, Gerencia de Telecomunicaciones – Unidad de Capacitación – Empresas Publicas de Medellín- Colombia.